

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-167565

(43) 公開日 平成11年(1999) 6月22日

(51) Int.Cl.⁶

識別記号

F I

G 0 6 F 17/14

G 0 6 F 15/332

A

G 0 1 R 23/16

G 0 1 R 23/16

B

27/28

27/28

T

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平10-277091

(71) 出願人 390005175

株式会社アドバンテスト

(22) 出願日 平成10年(1998) 9月30日

東京都練馬区旭町1丁目32番1号

(31) 優先権主張番号 特願平9-266347

(72) 発明者 荒川 則雄

東京都練馬区旭町1丁目32番1号 株式会

(32) 優先日 平9(1997) 9月30日

社アドバンテスト内

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(72) 発明者 紺野 裕幸

東京都練馬区旭町1丁目32番1号 株式会

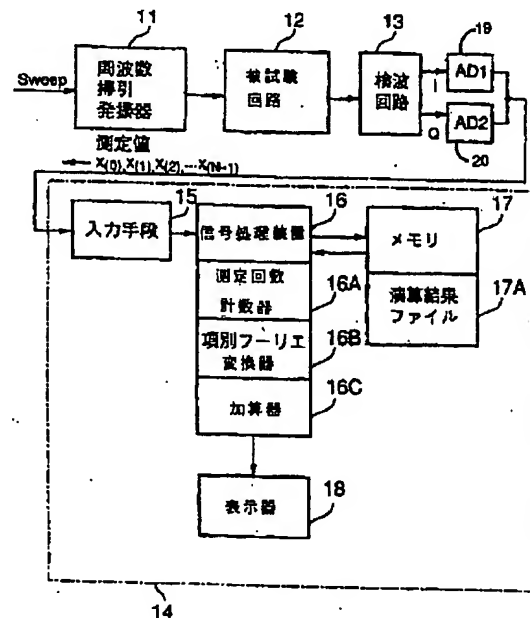
社アドバンテスト内

(54) 【発明の名称】 高速フーリエ変換装置及びネットワークアナライザ

(57) 【要約】

【課題】 フーリエ変換式の各項について離散的フーリエ変換プロセスを並列的に実行する、高速フーリエ変換方法および装置を提供する。さらに、フーリエ変換式の連続した複数項について離散的フーリエ変換プロセスを並列的に実行してフーリエ変換の計算回数を減少した、高速フーリエ変換方法および装置を提供する。

【解決手段】 離散的フーリエ変換の変換式を用いてフーリエ変換するフーリエ変換装置において、各テストポイントについてテストデータが得られる毎に、データ番号を計数する測定回数計数器と、そのデータ番号で規定された、複数のフーリエ変換式間に共通な複数の項について、フーリエ変換演算を実行するフーリエ変換器と、このフーリエ変換器により得られた、複数のフーリエ変換式間の共通項の、フーリエ変換演算結果を記憶する演算結果ファイルと、演算結果ファイルに記憶した各演算値を、全てのフーリエ変換式が最終結果を示すように、加算する加算手段と、によって構成され、そのフーリエ変換式の上記複数の項における、計算の冗長分を除去した高速フーリエ変換装置。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 離散的フーリエ変換の演算式を用いてフーリエ変換をするフーリエ変換装置において、テストポイントについてテストデータが得られる毎に、データ番号を計数する測定回数計数器と、該データ番号で規定された、複数のフーリエ変換式間の共通項について、フーリエ変換演算を実行するフーリエ変換器と、該フーリエ変換器により得られた、複数のフーリエ変換式間の、共通項についてのフーリエ変換演算結果を記憶する演算結果ファイルと、演算結果ファイルに記憶した各演算値を、全てのフーリエ変換式が最終結果を示すように、加算する加算手段と、

によって構成した高速フーリエ変換装置。

【請求項2】 N個のテストデータが上記フーリエ変換器に供給され、該各テストデータは実数部と虚数部を有し、上記複数のフーリエ変換式はN個の離散的フーリエ変換式により構成され、かつ該各フーリエ変換式はN個の項を有する、請求項1記載の高速フーリエ変換装置。

【請求項3】 該演算結果ファイルは、上記複数のフーリエ変換式の全ての項に対応して、アレイ状に配置された上記演算結果を蓄積するための記憶領域を有する、請求項1記載の高速フーリエ変換装置。

【請求項4】 該演算結果ファイルは、上記複数のフーリエ変換式の数に対応した上記演算結果を蓄積するための記憶領域を有し、上記フーリエ変換により、該フーリエ変換式の各項について得られた前回の演算結果に、新たな演算結果を加えることにより、上記演算結果の累計を該記憶領域に蓄積する、請求項1記載の高速フーリエ変換装置。

【請求項5】 離散的フーリエ変換の変換式を用いてフーリエ変換するフーリエ変換装置において、各テストポイントについてテストデータが得られる毎に、データ番号を計数する測定回数計数器と、該データ番号で規定された、複数のフーリエ変換式間に共通な複数の項について、フーリエ変換演算を実行するフーリエ変換器と、該フーリエ変換器により得られた、複数のフーリエ変換式間の共通項の、フーリエ変換演算結果を記憶する演算結果ファイルと、演算結果ファイルに記憶した各演算値を、全てのフーリエ変換式が最終結果を示すように、加算する加算手段と、

によって構成され、該フーリエ変換式の上記複数の項における、計算の冗長分を除去した高速フーリエ変換装置。

【請求項6】 該複数の項は3項であり、上記複数のフーリエ変換式間に共通の3項についてフーリエ変換の演算が同時に実行される、請求項5記載の高速フーリエ変

換装置。

【請求項7】 N個のテストデータが上記フーリエ変換器に供給され、該各テストデータは実数部と虚数部を有し、上記複数のフーリエ変換式はN個の離散的フーリエ変換式により構成され、該各フーリエ変換式はN個の項を有し、上記フーリエ変換器は、上記複数のフーリエ変換式間に共通の3項についてフーリエ変換の演算を同時に実行する、請求項1記載の高速フーリエ変換装置。

【請求項8】 N個のデータサンプルを連続的に生成するデータサンプリング装置と、該データサンプリング装置に接続され、N個のフーリエ項のうち受けたデータサンプルに対応する項について計算する項別フーリエ計算器と、該項別フーリエ計算器は該データサンプルを受けることにより動作し、該項別フーリエ計算器に接続され、該計算されたフーリエ項を記憶するための項別フーリエ記憶装置と、該計算されたフーリエ項を加算して、該N個の連続的データサンプルについてのフーリエ変換結果を生成するアキュムレータと、

により構成される高速フーリエ変換装置。

【請求項9】 被試験装置の応答特性を分析するためのネットワークアナライザにおいて、印加された信号に対する被試験装置の応答をあらゆる信号をディジタルに変換する変換器と、該変換器に接続され、該ディジタル信号を周波数領域において処理して、該印加された信号に対する被試験装置の応答の、伝達関数を計算するための伝達関数アナライザと、

該伝達関数アナライザはさらに、該計算された伝達関数に基づいて、該被試験装置のシミュレートされた信号に対する応答特性に対応する、周波数領域での信号を計算し、

複数の離散的フーリエ変換(DFT)式に共通する、周波数領域での少なくとも1つのデータサンプルについて、並列フーリエ変換動作を行う高速フーリエ変換器と、該高速フーリエ変換器は該周波数領域信号を受けるように接続され、該周波数領域信号を時間領域信号に実質的に実時間で変換し、該各離散的フーリエ式は得られた時間領域信号点に対応し、

これらにより構成されるネットワークアナライザ。

【請求項10】 該高速フーリエ変換器は、複数の離散的フーリエ変換式に共通する複数の周波数領域データサンプルについて並列フーリエ変換動作を実施する、請求項9記載のネットワークアナライザ。

【請求項11】 該複数の周波数領域データサンプルは3個であり、該複数の離散的フーリエ変換式間に共通の3データサンプルについて、フーリエ変換の演算を同時に実行する、請求項10記載のネットワークアナライザ。

【請求項12】 該高速フーリエ変換器は、複数の離散

的フーリエ変換式に共通する3個の連続した周波数領域データサンプルについて、並列フーリエ変換動作を実施する、請求項10記載のネットワークアナライザ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明はたとえばネットワークアナライザ或いはスペクトラムアナライザなどの測定器に利用して好適な高速フーリエ変換装置に関し、特に離散的フーリエ変換を並列に実行する高速フーリエ変換装置に関する。

【0002】

【従来の技術】フーリエ変換技術、例えばFFT（ファーストフーリエトランスフォーム）は、ネットワークアナライザやスペクトラムアナライザ等の計測器において、素子の応答特性を分析したり、入力信号の周波数スペクトラムを分析する等のために、広く用いられている。例えば、そのようなフーリエ変換処理は、所定の時間間隔で測定して得られた時間領域データに用いられる。この時間領域データを周波数領域データに変換して、入力信号の周波数領域での周波数成分を分析し、あるいは周波数スペクトルを求めている。

【0003】これとは反対に、フーリエ変換処理により周波数領域のデータを時間領域データに変換することもあり、その場合は逆フーリエ変換とも呼ばれる。例えば、フィルタあるいは他の通信デバイスを測定する場合において、ネットワークアナライザにより、その被試験デバイスに周波数掃引信号を与え、その結果としての周波数領域の信号を、所定の周波数ステップ毎に測定する。この測定したデータに基づいて、ネットワークアナライザは、被試験デバイスの伝達関数、反射係数、位相変移、群遅延（グループデレー）、スミスチャート等の各種のパラメータを計算し表示する。

【0004】ネットワークアナライザはさらに、被試験デバイスの時間領域での応答、例えば時間軸反射特性（TDR）を求めるために用いられることもある。その場合、被試験デバイスの伝達関数を示す周波数領域データが、逆フーリエ変換により時間領域データに変換される。この逆フーリエ変換処理の前に、周波数領域において、窓関数が伝達関数に掛けられることもある。これにより、被試験デバイスの時間領域での応答特性、例えばインパルス応答特性を、実際にそのデバイスにインパルスを印加することなく分析することができる。

【0005】このようなフーリエ変換の手法は基本的には、いわゆる離散的フーリエ変換に基づいており、被試験デバイスの応答は、一定間隔の連続的なサンプルにより得られる離散的ハーモニクスとして測定される。離散的フーリエ変換は多くの演算回数を要する。すなわちN個の測定点から得られた測定値を離散的フーリエ変換する場合、 N^2 回の演算を必要とし、演算量が膨大になるため、全体としての演算に大きな時間が掛かる欠点があ

った。

【0006】この欠点を解消するために、FFTと呼ばれる高速フーリエ変換方法が、クーリとチューキにより開発された。FFTは離散的フーリエ変換に要する演算回数を減少させるためのアルゴリズムであり、一般にコンピュータにより実行され、フーリエ変換の実行における冗長動作を除去することにより、演算回数を削減する。FFTによれば、N個のサンプルデータをフーリエ変換する場合の演算量は、 $N \log_2 N$ で表される。したがってFFTは、離散的フーリエ変換より演算量を大幅に減少できるので、特に大量のデータを扱う場合には、従来の離散的フーリエ変換よりはるかに高速の処理ができる。

【0007】然しながら、このFFTにも欠点がある。まずFFTは取り扱うN個のデータ数が、2のべき乗であることを必要とするので、そのアプリケーションが制限されることがある。また他の重要な問題として、FFTはN個のサンプルデータの全てが揃わないと、フーリエ変換の演算を始められない特質を持っている。このため測定開始からフーリエ変換終了までに必要な時間は、図8に示すように測定時間 T_{meas} に演算処理時間 T_{FFT} を加えた $T_{meas} + T_{FFT}$ が、全体のフーリエ変換に要する時間になる。

【0008】一方FFTを進展させ、FFTより分解能よくフーリエ変換することができる、チャープZ変換と呼ばれているフーリエ変換方法もある。このチャープZ変換方法の他の利点は、データサンプルの数が2のべき乗であることを必要としないことである。このフーリエ変換手法は1975年発行のラビナーとゴールドによる「デジタル信号処理の理論と応用」393-398ページ、に記載されている。この変換方法は変換時間に限ってみるならば、FFTを3回繰返して結果を得る変換方法であるため、変換に要する時間は図9に示すように測定時間 T_{meas} にFFTの3倍の時間 $3T_{FFT}$ を加えた時間になる。すなわちチャープZ変換は従来のFFTにおいて必要な変換時間より長い変換時間を要する。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】したがって、この発明の目的は、従来のフーリエ変換技術における問題を克服することができる、高速フーリエ変換方法と装置を提供することにある。この発明の他の目的は、測定時間 T_{meas} を含めて従来のFFT手法より短時間にフーリエ変換の結果を得ることができる、高速フーリエ変換方法および装置を提案するものである。この発明のさらに他の目的は、サンプルデータを得ながらそれと同時に実時間的に離散的フーリエ変換プロセスを実行する、高速フーリエ変換方法および装置を提供することにある。この発明のさらに他の目的は、フーリエ変換式の各項について離散的フーリエ変換プロセスを並列的に実行する、高速フーリエ変換方法および装置を提供することにある。こ

の発明のさらに他の目的は、フーリエ変換式の連続した複数項について離散的フーリエ変換プロセスを並列的に実行する、高速フーリエ変換方法および装置を提供することにある。この発明のさらに他の目的は、フーリエ変換式の単独項あるいは連続的な複数項について、離散的フーリエ変換プロセスを並列的に実行する高速フーリエ変換方法を用いた、ネットワークアナライザ装置を提供することにある。

【0010】本発明の高速フーリエ変換方法および装置は、本発明の出願人により新たに開発された、並列離散的フーリエ変換手法に基づいている。本発明の高速フーリエ変換は、複数のフーリエ変換式間の共通項の演算は、それに対応する順番のデータサンプルを基にして、他の共通項とは独立に実行できる、との事実に基づいている。フーリエ変換式の各項の総和が、最終的なフーリエ変換結果となる。本発明のフーリエ変換手法はまた、最近のデジタル処理デバイスの動作の高速化を利用して達成されている。また本発明の高速フーリエ変換方法および装置は、並列離散的フーリエ変換を実行する際に、継続する複数項についてまとめてフーリエ変換の演算をおこなうことにより、演算の冗長性を省き、計算回数を減少させている。

【0011】この発明の高速フーリエ変換装置は、データサンプルが得られる毎に、複数のフーリエ変換式の対応する共通項について変換演算をする、離散的フーリエ変換器により構成されている。その共通項は測定動作の開始から計数した、データサンプルの順番に対応している。本発明の高速フーリエ変換装置はさらに、この離散的フーリエ変換手段が演算した演算値を、複数のフーリエ変換式の項に対応して配列別に記憶する演算結果ファイルに有している。本発明の高速フーリエ変換装置はさらに、この演算結果ファイルに変換結果の配列別に記憶された演算値を、各変換結果の配列毎に加算し、複数のフーリエ変換式の最終的な変換結果を得るための、加算器を有している。

【0012】この発明による高速フーリエ変換装置によれば、例えば被試験デバイスに周波数掃引信号を入力する。この周波数掃引信号の所定の周波数間隔について、被試験デバイスの出力信号をN回測定して、サンプル数Nの周波数領域データを得る。N個のフーリエ変換式について、この測定プロセスにより得られたデータサンプルの取得順に対応する共通項について、離散的フーリエ変換を実行する。データサンプルの取得順は、例えばその測定プロセスの開始点を基準にした測定回数により規定する。フーリエ変換式の共通項についての演算プロセスは、取得したデータサンプルについて実時間で実行され、次のデータサンプルが得られる前に終了する。したがって、次の測定データサンプルが得られるまでに、離散的フーリエ変換式の共通なN項の演算が行われる。最近のデジタル信号処理デバイスの高速化により、アナ

ログ掃引周波数発生器の各周波数間隔の時間より速く、共通なN項の離散的フーリエ変換演算が可能である。

【0013】よって最後の測定値が得られた時点では、その最後のN番目のフーリエ変換をするのみで、N個の測定データについて離散的フーリエ変換の全ての項の演算が完了する。得られた項別の演算結果を、フーリエ変換式の配列別に加算すれば、最終的なフーリエ変換結果を得ることができる。

【0014】結局この発明によれば、測定時間 T_{MEAS} にフーリエ変換式中の1項分の演算処理に要する時間 T_{OFF} を加えた $T_{\text{MEAS}} + T_{\text{OFF}}$ の時間により、全ての演算処理が終了する。フーリエ変換式中の1項分の演算処理に要する時間 T_{OFF} は、各測定点間の時間 Δt より短いので、この発明によれば、測定データの取得終了とほぼ同時に最終的なフーリエ変換結果を得ることができる。本発明の他の実施例では、離散的フーリエ変換における計算の冗長性を省き、全体としての計算回数を減少させる手法を示している。以上のような本発明の目的と優位性は、以下の詳細な説明と添付した図面を参照して、より明らかになるであろう。

【0015】

【課題を解決するための手段】

【0016】離散的フーリエ変換の演算式を用いてフーリエ変換をするフーリエ変換装置において、テストポイントについてテストデータが得られる毎に、データ番号を計数する測定回数計数器と、そのデータ番号で規定された、複数のフーリエ変換式間の共通項について、フーリエ変換演算を実行するフーリエ変換器と、このフーリエ変換器により得られた、複数のフーリエ変換式間の、共通項についてのフーリエ変換演算結果を記憶する演算結果ファイルと、演算結果ファイルに記憶した各演算値を、全てのフーリエ変換式が最終結果を示すように、加算する加算手段と、によって高速フーリエ変換装置を構成する。

【0017】また、上記の高速フーリエ変換装置で、N個のテストデータが上記フーリエ変換器に供給され、その各テストデータは実数部と虚数部を有し、上記複数のフーリエ変換式はN個の離散的フーリエ変換式により構成され、かつその各フーリエ変換式はN個の項を有するように構成してもよい。また、上記の高速フーリエ変換装置で、その演算結果ファイルは、上記複数のフーリエ変換式の全ての項に対応して、アレイ状に配置された上記演算結果を蓄積するための記憶領域を有するように構成してもよい。また、上記の高速フーリエ変換装置で、その演算結果ファイルは、上記複数のフーリエ変換式の数に対応した上記演算結果を蓄積するための記憶領域を有し、上記フーリエ変換により、そのフーリエ変換式の各項について得られた前回の演算結果に、新たな演算結果を加えることにより、上記演算結果の累計をその記憶領域に蓄積するように構成してもよい。

【0018】さらに、次のように構成してもよい。離散
的フーリエ変換の変換式を用いてフーリエ変換するフー
リエ変換装置において、各テストポイントについてテスト
データが得られる毎に、データ番号を計数する測定回
数計数器と、そのデータ番号で規定された、複数のフー
リエ変換式間に共通な複数の項について、フーリエ変換
演算を実行するフーリエ変換器と、このフーリエ変換器
により得られた、複数のフーリエ変換式間の共通項の、
フーリエ変換演算結果を記憶する演算結果ファイルと、
演算結果ファイルに記憶した各演算値を、全てのフー
リエ変換式が最終結果を示すように、加算する加算手段
と、によって構成され、そのフーリエ変換式の上記複数
の項における、計算の冗長分を除去して高速フーリエ変
換装置を構成する。

【0019】また、上記高速フーリエ変換装置で、その
複数の項は3項であり、上記複数のフーリエ変換式間に
共通の3項についてフーリエ変換の演算が同時に実行さ
れるように構成してもよい。また、上記の高速フーリエ
変換装置で、N個のテストデータが上記フーリエ変換器
に供給され、その各テストデータは実数部と虚数部を有
し、上記複数のフーリエ変換式はN個の離散的フーリエ
変換式により構成され、その各フーリエ変換式はN個の
項を有し、上記フーリエ変換器は、上記複数のフーリエ
変換式間に共通の3項についてフーリエ変換の演算を同
時に実行するように構成してもよい。

【0020】さらに、次のように構成してもよい。N個
のデータサンプルを連続的に生成するデータサンプリ
ング装置と、そのデータサンプリング装置に接続され、N
個のフーリエ項のうち受けたデータサンプルに対応する
項について計算する項別フーリエ計算器と、その項別フ
ーリエ計算器はそのデータサンプルを受けることにより
動作し、この項別フーリエ計算器に接続され、その計算
されたのフーリエ項を記憶するための項別フーリエ記憶
装置と、その計算されたフーリエ項を加算して、そのN
個の連続的データサンプルについてのフーリエ変換結果
を生成するアキュムレータと、により高速フーリエ変
換装置を構成してもよい。

【0021】さらに、次のように構成してもよい。被試
験装置の応答特性を分析するためのネットワークアナライ
ザにおいて、印加された信号に対する被試験装置の応
答をあらわす信号をデジタルに変換する変換器と、そ
の変換器に接続され、そのデジタル信号を周波数領域
において処理して、その印加された信号に対する被試験
装置の応答の、伝達関数を計算するための伝達関数アナ
ライザと、その伝達関数アナライザはさらに、その計算
された伝達関数に基づいて、その被試験装置のシミュレ
ートされた信号に対する応答特性に対応する、周波数領
域での信号を計算し、複数の離散的フーリエ変換(DF
T)式に共通する、周波数領域での少なくとも1つのデ
ータサンプルについて、並列フーリエ変換動作を行う高

速フーリエ変換器と、その高速フーリエ変換器はその周
波数領域信号を受けるように接続され、その周波数領域
信号を時間領域信号に実質的に実時間で変換し、その各
離散的フーリエ式は得られた時間領域信号点に対応し、
これらによりネットワークアナライザを構成してもよ
い。

【0022】また、上記のネットワークアナライザで、
その高速フーリエ変換器は、複数の離散的フーリエ変換
式に共通する複数の周波数領域データサンプルについて
並列フーリエ変換動作を実施するように構成してもよ
い。また、上記のネットワークアナライザで、その複数の
周波数領域データサンプルは3個であり、その複数の
離散的フーリエ変換式間に共通の3データサンプルにつ
いて、フーリエ変換の演算を同時に実行するように構成
してもよい。また、上記のネットワークアナライザで、
その高速フーリエ変換器は、複数の離散的フーリエ変換
式に共通する3個の連続した周波数領域データサンプル
について、並列フーリエ変換動作を実施するように構成
してもよい。

【0023】

【発明の実施の形態】図1にこの発明によるフーリエ変
換装置の一実施例を示す。図1に示す実施例では、周波
数掃引発振器11から被試験回路12に、周波数掃引信
号が与えられる。被試験回路12から出力される信号
は、検波回路13に入力される。検波回路13は、被試
験回路12からの出力信号について、周波数掃引発振器
11の発振信号の周波数における、実数部と虚数部を検
波する。この試験のための周波数はほぼ直流からマイク
ロ波周波数までの範囲で可能であり、特に無線周波数で
動作する被試験対象に適している。よく知られているよ
うに、周波数掃引発振器11は個別の固定周波数の信号
を被試験回路に供給することもできる。AD変換器19
および20は、検波回路13からの実数部と虚数部の検
波出力を受け、それらをデジタル信号に変換する。

【0024】AD変換器からのデジタルデータはフー
リエ変換器14に入力される。この入力データは、複素
数測定値(以下測定値 $x_{(0)}$ 、 $x_{(1)}$ 、 $x_{(2)}$ 、 \dots 、 $x_{(n-1)}$ と称す)となっており、フーリエ変換器14は
この入力データについて、高速の離散的フーリエ変換を
行う。これにより周波数領域データがフーリエ変換(正
式にはフーリエ逆変換)されて、時間領域のデータとな
る。

【0025】周波数掃引発振器11は図2に示すよう
に、時間Tの経過と共に、発信周波数が周波数F1から
F2まで直線的に増加する周波数掃引動作を行う。AD
変換器は一定時間間隔 Δt 毎、したがって図2の一定周
波数ステップ Δf 毎にAD変換を繰り返す。周波数掃引
発振器11の周波数掃引速度が一定のものであるとすれ
ば、検波回路13およびAD変換器から得られる測定値
 $x_{(0)}$ 、 $x_{(1)}$ 、 $x_{(2)}$ 、 \dots 、 $x_{(n-1)}$ は、一定の周波数

間隔 Δf 毎に被試験回路12の応答出力を測定した測定値と見ることができる。

【0026】この発明による高速フーリエ変換装置14は、並列離散的フーリエ変換(PDFT)を行うものであり、入力手段15例えばデータバッファと、信号処理装置としてのプロセッシングデバイス16例えばデジタル信号プロセッサと、メモリ17および表示器18例えばCRTモニタとによって構成される。プロセッシングデバイス16は、測定回数計数器16Aと、項別フーリエ変換器16Bと、加算器16Cとを有している。好ま*10

$$X_{(n)} = 1/N \sum_{m=0}^{N-1} x_{(m)} \exp(-j2\pi n m/N) \quad \dots \quad (1)$$

周波数領域データを時間領域データに変換する場合は、

$$X_{(n)} = \sum_{m=0}^{N-1} x_{(m)} \exp(j2\pi n m/N) \quad \dots \quad (2)$$

で表される。この図1の実施例では、周波数領域のデータを時間軸領域のデータに変換する場合について説明しているから、以下の説明は(2)式に基づいて説明することにする。この技術分野の通常の知識を有する者には、どちらの変換方向であっても、本発明の原理が適用できることは明らかであろう。

【0028】式2において $X(n)$ はフーリエ変換した変換結果を示す。式2は図4に示すような複数の式に表すことができ、 $X(n)$ は各時間領域の各ポイントをあらわすこととなる。各式の右辺は測定値 $x(m)$ (周波数領域データサンプル)が与えられた場合に、それに対応して演算する項の集合になっている。この発明の1つの特徴は、図4に示した複数の演算式において、測定値 $x_{(0)}, x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n-1)}$ の1つが得られるごとに、図4に示す複数の演算式において、N個のフーリエ変換項の演算がなされることにある。

【0029】このフーリエ変換プロセスを実行するため、この発明では測定回数計数器16Aと、項別フーリエ変換器16Bが設けられている。測定回数計数器16Aは、検波回路13とAD変換器を通して測定値 $x_{(0)}, x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n-1)}$ が入力される毎に、その計数値を+1して、測定データ数を計数する。項別フーリエ変換器16Bは、測定回数計数器16Aのデータ番号に従って、演算式の項番号を特定し、その特定された項番号についてフーリエ変換の演算を実行する。この演算は図4の式の同じ位置の項について、すなわち同一欄について実行される。その演算結果はメモリ17に設けた演算結果ファイル17Aに記憶される。

【0030】図5に演算結果ファイル17Aの内部の様子を示す。図中のラベル $A_{0,0}, \dots, A_{(n-1),(n-1)}$ は、演算結果ファイル17Aに格納されるフーリエ演算式(図4)の各項を示す。図5の例において、ラベルAの先の添え字は時間領域ポイントの順番を示し、後の添え字はデータサンプルの順番を示す。

【0031】1回目の測定値 $x_{(0)}$ がAD変換器から入力されると、測定回数計数器16Aは測定回数 $n=n=0$ に初期設定する。測定回数計数器16Aは、項別フー

*しくは、このプロセッシングデバイス16は、テキサスインスツルメント社のデジタル信号プロセッサ、TMS320C30で構成される。メモリ17は、項別フーリエ変換器16Bの演算結果を記憶するための、演算結果ファイル17Aを有する。

【0027】図4及び図5は、離散的フーリエ変換に用いる演算式とメモリ17に設けた演算結果ファイル17Aをあらわしている。時間領域データを周波数領域データに変換するための、離散的フーリエ変換の演算式は

リエ変換器16Bに、フーリエ変換式の第1項目を演算するように指示する。項別フーリエ変換器16Bはその指示に従って、図4に示した演算式の第1項目の演算、 $x_{(0)} \exp(j2\pi \cdot 0 \cdot 0/N), x_{(0)} \exp(j2\pi \cdot 1 \cdot 0/N), x_{(0)} \exp(j2\pi \cdot 2 \cdot 0/N), \dots, x_{(0)} \exp(j2\pi \cdot (n-1) \cdot 0/N)$ を行う。各演算結果は図5の演算結果ファイル17Aの配列変数部分 $A_{0,0}, A_{1,0}, A_{2,0}, \dots, A_{n-1,0}$ に記憶される。

【0032】2回目の測定値 $x_{(1)}$ がAD変換器から入力されると、測定回数計数器16Aは、このデータが2回目測定データであることを示すために、測定回数 $n=n=1$ に設定する。これと共に測定回数計数器16Aは、項別フーリエ変換器16Bに、フーリエ変換式の第2項目を演算するように指示する。これにより項別フーリエ変換器16Bはその指示に従って、図4に示した演算式の第2項目の演算、すなわち $x_{(1)} \exp(j2\pi \cdot 0 \cdot 1/N), x_{(1)} \exp(j2\pi \cdot 1 \cdot 1/N), x_{(1)} \exp(j2\pi \cdot 2 \cdot 1/N), \dots, x_{(1)} \exp(j2\pi \cdot (n-1) \cdot 1/N)$ を行う。各演算結果は図5の演算結果ファイル17Aの配列変数部分 $A_{0,1}, A_{1,1}, A_{2,1}, \dots, A_{n-1,1}$ に記憶される。

【0033】このように、この発明ではAD変換器がAD変換した測定値 $x_{(0)}, x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n-1)}$ を出力する毎に、各項毎にフーリエ変換する。好ましい実施例では次の測定値が入力されるまでの間(Δt の時間内)に、各項毎の演算が済んでいるので、最後の測定値 $x_{(n-1)}$ が入力された時点では、最後の項の演算だけを行えばよい。この演算結果は図5の演算結果ファイル17Aに記憶される。最後に加算器16Cにより、演算結果ファイル17Aに記憶した各演算結果を加算して、各フーリエ変換式の変換結果 $X_{(0)}, X_{(1)}, \dots, X_{(n-1)}$ を求める。フーリエ変換の最終結果は、表示器18により、数値列或いはグラフ等の形態で表示させることができる。

【0034】好ましい実施例では、この各項別のフーリエ変換は、検波回路13やAD変換器19における測定時間間隔 Δt の範囲内で終了する。したがって、この発明による高速フーリエ変換装置14のフーリエ変換に要

する時間は、図6に示すように、測定値 $x_{(0)}, x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n-1)}$ の全体の測定時間 T_{MeS} に、項別フーリエ変換器16Bの最後の項の演算処理時間 T_{ofT} を加えた時間 $T_{MeS} + T_{ofT}$ で済むことになる。

【0035】項別フーリエ変換器16Bの演算時間 T_{ofT} は、測定点数 N を例えば200点とした場合、50MHzのクロック周波数で動作するDSP（デジタル・シグナル・プロセッサ）を用いたとすると、約200 μ sで各項の演算を処理することができる。従って、周波数掃引発振器11の掃引ステップ時間 Δt を約1msとし、AD変換器の変換速度をこのステップ時間に適合するようにすると、図6に示すように、測定値 $x_{(0)}, x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n-1)}$ が入力される測定時間間隔 Δt の範囲で、十分にフーリエ変換式の各項の演算をすることができる。

【0036】このように一般に入手できるDSPを用いると、項別フーリエ変換器16Bの共通項についての演算時間 T_{ofT} は、例えば200マイクロ秒であり、掃引信号発振器のステップ時間例えば1ミリ秒より十分に短い時間で実行できる。したがって、本発明によれば、全体のフーリエ変換に要する時間は、図6に示す測定時間 T_{MeS} にほぼ等しい時間となる。したがって *

$$\begin{aligned} X(0) &= x_{(0)} W_{0:0} + x_{(1)} W_{0:1} + x_{(2)} W_{0:2} + \dots + x_{(N-1)} W_{0:N-1} \\ X(1) &= x_{(0)} W_{1:0} + x_{(1)} W_{1:1} + x_{(2)} W_{1:2} + \dots + x_{(N-1)} W_{1:N-1} \\ X(2) &= x_{(0)} W_{2:0} + x_{(2)} W_{2:1} + x_{(2)} W_{2:2} + \dots + x_{(N-1)} W_{2:N-1} \\ &\vdots \\ X(N-1) &= x_{(0)} W_{N-1:0} + x_{(1)} W_{N-1:1} + x_{(2)} W_{N-1:2} + \dots + x_{(N-1)} W_{N-1:N-1} \\ &\dots (3) \end{aligned}$$

【0039】フーリエ変換を実行するために、フーリエ変換式の各項、例えば最初の式における $x_{(2)}, W_{0:2}$ に

$$(a + jb)(c + jd) = (ac - bd) + j(ad + bc) \quad \dots$$

(4)

それは4回のかけ算と2回の足し算により構成されていることがわかる。フーリエ変換式では、さらにこの計算結果の実部と虚部を、その前の計算結果の実部と虚部にそれぞれ累積するための計算が2回必要である。したがって、変換式の1の項について、合計で8回の計算が必要であることになる。

【0040】離散的フーリエ変換に要する計算回数を減少させるために、3個の継続する項について、まとめて計算する場合を考える。式3における継続する3項を一般的な形式であらわすと以下になる。

* って、本発明のフーリエ変換装置および方法では、従来のFFTより高速に変換できる。

【0037】尚、上記の実施例では、フーリエ変換に用いる演算式の項番号に等しい数の配列変数部分 $A_{0:0}, \dots, A_{(N-1):(N-1)}$ を、演算結果ファイル17Aに設けた例を示したが、他のデータ蓄積管理方法も可能である。例えば各項別フーリエ関数の演算を行う毎に、過去に演算した演算結果に今回演算して得られた演算結果を加える方法を探ることもできる。この場合には、図7に示すように、演算結果ファイル17Aのメモリ配置は、 $A_0, A_1, A_2, \dots, A_{N-1}$ のように一方向のアレー構造でよく、そこに N 個のフーリエ変換式の各フーリエ項の和を格納する。

【0038】本発明の第2の実施例について以下に説明する。この実施例においては、継続する複数のデータ点について、まとめて離散的フーリエ変換の演算を行う。この発明においては、継続する複数のフーリエ項の演算において存在する冗長性に注目することにより、全体としての演算数を減少させることができる。上記の式2における $\exp(j2\pi n \cdot m/N)$ を $W_{n:m}$ に簡略して置き換えると、図4の離散的フーリエ変換式は以下のように表現される。

※る。2つの複素数のかけ算は以下のようにあらわされる。

$$\begin{aligned} X(n-1) W_{0:n-1} + X(n) W_{0:n} + X(n+1) W_{0:n+1} \\ X(n-1) W_{1:n-1} + X(n) W_{1:n} + X(n+1) W_{1:n+1} \\ \vdots \\ X(n-1) W_{n-1:n-1} + X(n) W_{n-1:n} + X(n+1) W_{n-1:n+1} \\ X(n-1) W_{n:n-1} + X(n) W_{n:n} + X(n+1) W_{n:n+1} \\ X(n-1) W_{n+1:n-1} + X(n) W_{n+1:n} + X(n+1) W_{n+1:n+1} \\ \vdots \\ X(n-1) W_{N-1:n-1} + X(n) W_{N-1:n} + X(n+1) W_{N-1:n+1} \\ \dots (5) \end{aligned}$$

【0041】この式5は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned}
W_{0:n} & \{W_{0:-1} X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{0:1} X_{(n+1)}\} \\
W_{1:n} & \{W_{1:-1} X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{1:1} X_{(n+1)}\} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{W_{n-1:-1} X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n-1:1} X_{(n+1)}\} \\
W_{n:n} & \{W_{n:-1} X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n:1} X_{(n+1)}\} \\
W_{n+1:n} & \{W_{n+1:-1} X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n+1:1} X_{(n+1)}\} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{W_{n-1:-1} X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n-1:1} X_{(n+1)}\} \\
& \dots (6)
\end{aligned}$$

【0042】複素共役数を添え字*であらわすと $W_{n:-1} = W_{n:1}^*$ の関係が成り立つので、上記式6は以下のうに書き換えられる。

$$\begin{aligned}
W_{0:n} & \{W_{0:1}^* X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{0:1} X_{(n+1)}\} \\
W_{1:n} & \{W_{1:1}^* X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{1:1} X_{(n+1)}\} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{W_{n-1:1}^* X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n-1:1} X_{(n+1)}\} \\
W_{n:n} & \{W_{n:1}^* X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n:1} X_{(n+1)}\} \\
W_{n+1:n} & \{W_{n+1:1}^* X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n+1:1} X_{(n+1)}\} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{W_{n-1:1}^* X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n-1:1} X_{(n+1)}\} \\
& \dots (7)
\end{aligned}$$

【0043】式7の表現を実数部と虚数部の和の形式に変換すると、例えば式7中の第5行の部分は以下のよう*

$$W_{n:n} \{X_{0r} + W_{n:1r} X_{1r} + W_{n:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{n:1r} X_{1i} - W_{n:1i} X_{1r})\} \quad \dots (11)$$

【0047】したがって式7の全体を式11のような実数部と虚数部の和の形式に当てはめると以下のようにな※

$$\begin{aligned}
W_{0:n} & \{X_{0r} + W_{0:1r} X_{1r} + W_{0:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{0:1r} X_{1i} - W_{0:1i} X_{1r})\} \\
W_{1:n} & \{X_{0r} + W_{1:1r} X_{1r} + W_{1:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{1:1r} X_{1i} - W_{1:1i} X_{1r})\} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{X_{0r} + W_{n-1:1r} X_{1r} + W_{n-1:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{n-1:1r} X_{1i} - W_{n-1:1i} X_{1r})\} \\
W_{n:n} & \{X_{0r} + W_{n:1r} X_{1r} + W_{n:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{n:1r} X_{1i} - W_{n:1i} X_{1r})\} \\
W_{n+1:n} & \{X_{0r} + W_{n+1:1r} X_{1r} + W_{n+1:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{n+1:1r} X_{1i} - W_{n+1:1i} X_{1r})\} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{X_{0r} + W_{n-1:1r} X_{1r} + W_{n-1:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{n-1:1r} X_{1i} - W_{n-1:1i} X_{1r})\} \\
& \dots (12)
\end{aligned}$$

【0048】式12のカッコ{ }において、必要な計算回数は4回のかけ算と4回の足し算であることがわかる。この計算が完了すると、式12は上述の式4と同じ形式となり、その計算には上記のように、4回のかけ算と2回の足し算が必要である。さらにこの計算結果の実部と虚部を、それまでに得られた計算結果の実部と虚部にそれぞれ累積するための計算が2回必要である。したがって、式12の継続する3項の演算回数は、全体として16回となる。式4で述べたように、並列離散的フーリエ変換の動作において、何らの簡略化がなされないと★

*にあらわされる。

$$W_{n:n} \{W_{n:1}^* X_{(n-1)} + X_{(n)} + W_{n:1} X_{(n+1)}\} \quad \dots (8)$$

【0044】説明の簡単のため、式8の表現において、データx中のnを省略すると、式8は以下のように書き換えられる。

$$W_{n:n} \{W_{n:1}^* X_{-1} + X_0 + W_{n:1} X_{+1}\} \quad \dots (9)$$

【0045】式9を実数部と虚数部の和の形式に展開すると以下ようになる。

$$\begin{aligned}
W_{n:n} & \{[X_0 + W_{n:1r}(X_{-1r} + X_{+1r}) + W_{n:1i}(X_{-1i} - X_{+1i})] \\
& + j[W_{n:1r}(X_{-1i} + X_{+1i}) + W_{n:1i}(X_{-1r} - X_{+1r})]\} \\
& \dots (10)
\end{aligned}$$

【0046】ここで、 $X_{-r} = X_{-1r} + X_{+1r}$ 、 $X_{+i} = X_{-1i} + X_{+1i}$ 、 $X_{-r} = X_{-1r} - X_{+1r}$ 、 $X_{+i} = X_{-1i} - X_{+1i}$ の置き換えを式10に行うと以下のようにになる。

40★すれば、各変換式の3項について計24回の計算が必要であった。継続した3項について上記のような演算がなされると、次の継続する3項について同様に演算が実行され、この計算プロセスを3項毎に繰り返す。

【0049】本発明の第3の実施例を以下に説明する。上記の第2の実施例における継続する3項の演算の説明において、 $W_{n:-1:n} = W_{n:n}$ であるので、以上のような計算の簡略化に加えて、さらに計算回数を減少させることができる。例えば式12の最後の行は以下のように変換できる。

$$W_{n:n} \{X_{0r} + W_{n:1r} X_{1r} - W_{n:1i} X_{1i} + j(X_{0i} + W_{n:1r} X_{1i} + W_{n:1i} X_{1r})\} \quad \dots$$

(13)

【0050】また式12の2番目の行は以下のように変* *換できる。

$$W_{1:n} \{X_{0,r} + W_{1:1,r} X_{0,r} + W_{1:1,1} X_{1,1} + \dots\} (X_{0,1} + W_{1:1,1} X_{0,1} - W_{1:1,1} X_{0,r}) \dots$$

(14)

【0051】式13と式14を比較すると、互いに6個の共通な演算を有することがわかる。したがって、例えば式13の計算が完了すると、その中の演算で式14と共通なものは式14の計算の際には実行する必要がない。このような関係は、他の一対の式間にも同様に当てはまるので、計算回数をさらに減少させることができる。この例では2つの式の間で、6個の共通な演算があるので、1つの式については3回の計算回数を省略でき、したがって1の式全体として13回の計算でよいことになる。したがって、本発明の第1の実施例では、3項についての計算回数が24回必要であったが、この第3の実施例では計算回数が24回から13回へと、大きな減少を実現できる。

【0052】本発明の第4の実施例を以下に説明する。上述した高速フーリエ変換装置を、図10の概略図に示すようなネットワークアナライザに有効に適用することができる。周波数掃引発生器のような高周波信号源31は、被試験デバイス32に周波数掃引信号を与える。周波数掃引は例えば図2に示すようなステップ掃引であり、多数の周波数ステップにより実質的に直線的な周波数変化がなされる。周波数ステップ数(測定点)は、前記した離散的フーリエ変換のデータ点の数Nに対応する。高周波信号源31はまた、基準信号Rを発生する。例えば基準信号Rは、被試験デバイス32に与えられる周波数掃引信号と同一であり、振幅や位相の基準として用いられる。

【0053】被試験デバイス32の出力信号(試験信号)は、周波数変換器33に印加される。この例においては、周波数変換器33は、被試験デバイス32から方向性結合器や方向性ブリッジ(図示せず)を通して、2つの試験信号AおよびBを受ける。2つの試験信号の例としては、被試験デバイス32からの、伝達信号と反射信号がある。周波数変換器33はさらに、高周波信号源31からの基準信号Rを受ける。周波数変換器33はこれらの入力信号A、B、Rを、対応する中間周波試験信号A₁、B₁、および中間周波基準信号R₁に変換する。この周波数変換は既知のプロセスによりなされ、例えば周波数ミキサあるいはハーモニックスンプラにより、入力された信号周波数をローカル信号周波数との差となるようにダウンコンバートする。

【0054】AD変換器34-36は対応する中間周波信号A₁、B₁、R₁を受け取り、その中間周波信号をデジタル信号に変換して、マルチプレクサ38に与える。マルチプレクサ38はデジタル信号を選択的に検波器41に与える。検波器41は例えばデジタル直交検波器である。検波器41は入力デジタル信号の同相

(I)成分(実数部)と、90度差(Q)成分(虚数部)を検波する。当業者によく知られているように、そのような直交検波器は一对のマルチプレクサを有し、一方のマルチプレクサは、入力デジタル信号とコサインローカル信号をかけ算し、他方のマルチプレクサは、入力デジタル信号とサインローカル信号をかけ算する。さらに一对のローパスフィルタが、対応するマルチプレクサの出力に接続される。

【0055】伝達関数アナライザ42は、デジタル直交検波器41からI成分とQ成分をそれぞれ受け取り、被試験デバイス32の各種の応答特性、例えば伝達関数や反射係数を分析する。典型的にはそのような応答特性は、周知のスキャタリング(S)パラメータS₁₁、S₁₂、S₂₁、S₂₂によりあらわされる。スキャタリングパラメータを、メモリ45に格納された誤差補正データにより、誤差補正することができ、その結果は表示器48上に、周波数領域の形式(周波数対各パラメータ)で表示される。

【0056】もしさらに使用者が、被試験デバイスの時間領域での、仮想的信号についての応答を、求めることを望む場合のために、ネットワークアナライザは、窓関数発生器43と多項並列離散的フーリエ変換器(PDFT)44を有している。時間領域での応答の例としては、仮想インパルス信号に対する被試験デバイスの時間領域反射特性(タイムドメインリフレクトメトリ:TDR)がある。使用者によりインターフェイス51を経由して与えられたインストラクションに応答して、伝達関数アナライザ42により得られた周波数領域データは、窓関数発生器43により変更される。窓関数の例としては、方形ウィンドウやハミングウィンドウがある。例えば適切なハミングウィンドウを周波数領域に用いると、時間領域におけるリングングを効果的に除去することができる。

【0057】周波数領域における窓関数に対応する、時間領域でのインパルス波形例を、図11(A)および図11(B)に示す。11(A)は周波数領域における窓関数が、方形ウィンドウである場合の、時間領域のインパルス波形を示す。図11(B)は周波数領域における窓関数が、ハミングウィンドウである場合の、時間領域のインパルス波形を示す。したがって例えば、周波数領域でハミングウィンドウを伝達関数に乗ずることにより、被試験デバイスに、図11(B)のインパルスを仮想的に与えた場合に対応する、時間領域での波形を得ることができる。

【0058】窓関数発生器43は、伝達関数アナライザ42から得られた、周波数領域のデータを用いて、被試

験デバイスの仮想信号に対する時間領域での応答特性を、指定された窓関数により求める。その結果えられた時間領域での応答特性は、表示器48により表示される。多項並列離散的フーリエ変換器44は、基本的には図1の高速フーリエ変換装置14と同じ構成を有しており、上記の各実施例において説明した逆フーリエ変換動作を行う。この並列離散的フーリエ変換器44に必要な計算回数は、上述したようにフーリエ変換式の複数項中の、計算の冗長分を考慮することにより、減少させることができる。したがって、本発明の高速離散的フーリエ

変換装置をもちいることにより、本発明のネットワークアナライザは、被試験デバイスの時間領域での応答特性を、実質的にリアルタイムで求めることができる。【0059】さらに当技術分野でよく知られているように、伝達関数にベクトル誤差補正をほどこして、ネットワークアナライザの周波数変換器や他のコンポーネントにより生じた誤差を補正することができる。また時間領域で得られた出力に直接的に時間軸でのゲートを与え、あるいは周波数領域で得られた出力に、周波数軸でのゲートをコンボリューションにより与えてもよい。

【0060】また、上記では周波数領域データを時間領域データに変換する場合について説明したが、時間領域データを周波数領域データへと変換する場合にも、この発明による高速フーリエ変換装置を同様に用いることができることは容易に理解できよう。さらに、上述の各実施例は説明の便宜上の例として用いられているものであり、本発明の範囲を限定することを意図するものではない。特許請求範囲に記載された、本発明の技術的範囲を逸脱することなく、さまざまな変形や変更ができることが理解されるであろう。

【0061】

【発明の効果】本発明は、上述の説明内容から、下記に記載される効果を奏する。この発明によれば、測定時間 T_{MES} にフーリエ変換式中の1項分の演算処理に要する時間 T_{OFF} を加えた $T_{MES} + T_{OFF}$ の時間により、全ての演算処理が終了する。フーリエ変換式中の1項分の演算処理に要する時間 T_{OFF} は、各測定点間の時間 Δt より短いので、この発明によれば、測定データの取得終了とはほぼ同時に最終的なフーリエ変換結果を得ることができた。本発明の他の実施例では、離散的フーリエ変換における計算の冗長性を省き、全体としての計算回数を減少させる手法を実現できた。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明による高速フーリエ変換装置の基本的実施例を示すブロック図。

【図2】図1に示した高速フーリエ変換装置の周波数掃引信号を示す概念図。

【図3】図1に示した高速フーリエ変換装置により得られた周波数領域データの例を示す概念図。

【図4】この発明で用いる離散的フーリエ変換の演算式を説明するための概念図。

【図5】この発明による演算結果ファイルのデータ例を示す概念図。

【図6】この発明による高速フーリエ変換装置の動作タイミングを示すためのタイミングチャート。

【図7】この発明の変形実施例による演算結果ファイルのデータ例を示す概念図。

【図8】従来のFFT技術の動作を説明するためのタイミングチャート。

【図9】従来のチャープZ変換の動作を説明するためのタイミングチャート。

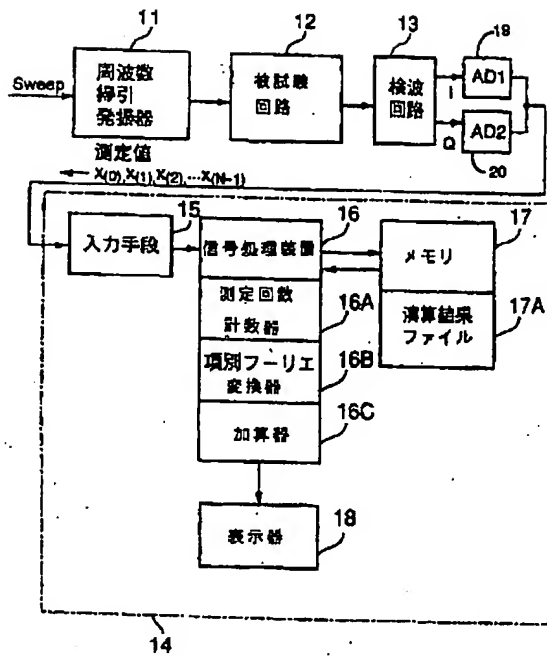
【図10】この発明の高速フーリエ変換装置を用いたネットワークアナライザの構成例を示すブロック図。

【図11】図11(A)および図11(B)は、それぞれ周波数領域における窓関数に対応する時間領域でのインパルス波形例を示す図。

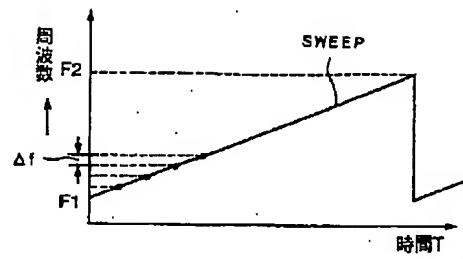
【符号の説明】

- 11 周波数掃引発振器
- 12 被試験回路
- 13 検波回路
- 14 高速フーリエ変換装置
- 15 入力手段
- 16 信号処理装置
- 16A 測定回数計数器
- 16B 項別フーリエ変換器
- 16C 加算器
- 17 メモリ
- 17A 演算結果ファイル
- 18 表示器
- 31 高周波信号源
- 32 被試験デバイス
- 33 周波数変換器
- 34 AD変換器
- 35 AD変換器
- 36 AD変換器
- 38 マルチプレクサ
- 41 検波器
- 42 伝達関数アナライザ
- 43 窓関数発生器
- 44 並列離散的フーリエ変換器
- 45 メモリ
- 48 表示器
- 51 インターフェイス

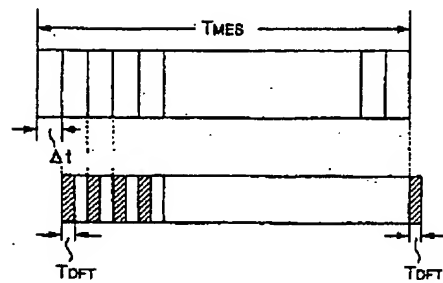
【図1】



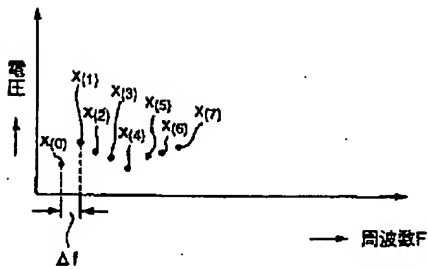
【図2】



【図6】



【図3】



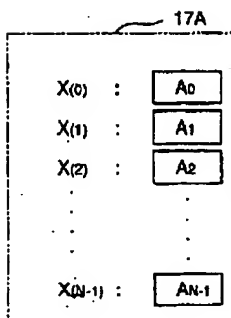
【図4】

1回目の演算 2回目の演算 3回目の演算 N回目の演算

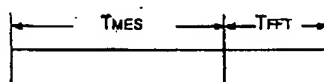
$$\begin{aligned}
 X(0) &= X(0)e^{j2\pi \cdot 0/N} + X(1)e^{j2\pi \cdot 1/N} + X(2)e^{j2\pi \cdot 2/N} + \dots + X(N-1)e^{j2\pi \cdot (N-1)/N} \\
 X(1) &= X(0)e^{j2\pi \cdot 1/N} + X(1)e^{j2\pi \cdot 1/N} + X(2)e^{j2\pi \cdot 2/N} + \dots + X(N-1)e^{j2\pi \cdot (N-1)/N} \\
 X(2) &= X(0)e^{j2\pi \cdot 2/N} + X(1)e^{j2\pi \cdot 2/N} + X(2)e^{j2\pi \cdot 2/N} + \dots + X(N-1)e^{j2\pi \cdot (N-1)/N} \\
 &\vdots \\
 X(N-1) &= X(0)e^{j2\pi \cdot (N-1)/N} + X(1)e^{j2\pi \cdot (N-1)/N} + X(2)e^{j2\pi \cdot 2/N} + \dots + X(N-1)e^{j2\pi \cdot (N-1)/N}
 \end{aligned}$$

変換結果

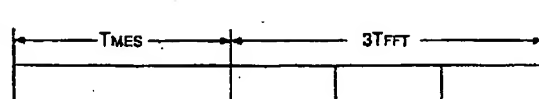
【図7】



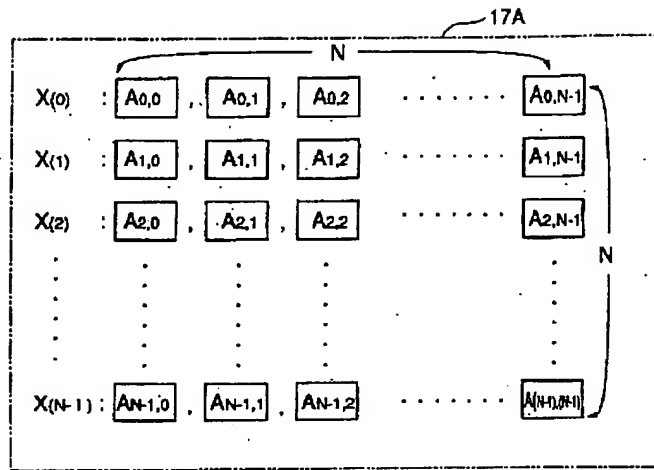
【図8】



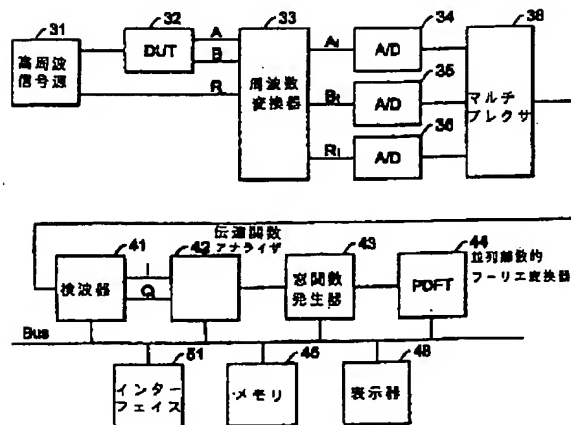
【図9】



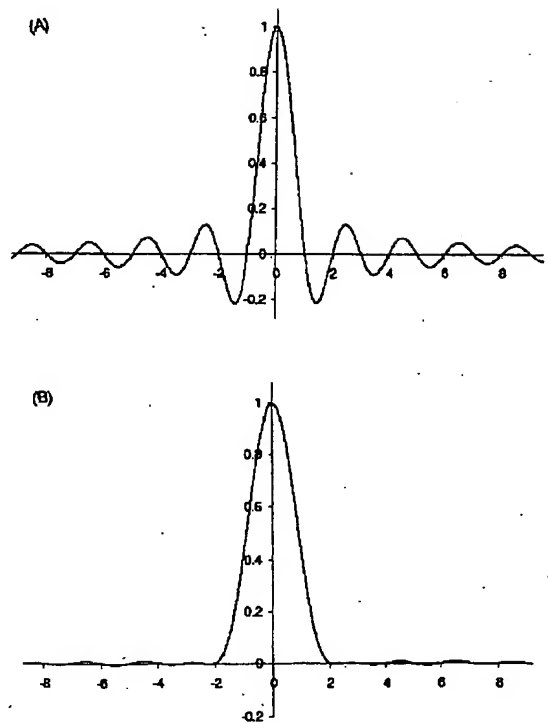
【図5】



【図10】



【図11】



* NOTICES *

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1] In the fourier inverter which carries out the Fourier transform using the operation expression of a discrete Fourier transform The measurement count counter which carries out counting of the data number whenever a test data is obtained about a test point, The fourier converter which was specified by this data number and which performs a Fourier transform operation about the common term between two or more fourier transformations, The result-of-an-operation file which was obtained with this Fourier transform vessel and which memorizes the Fourier transform result of an operation about the common term between two or more fourier transformations, Fast-Fourier-transform equipment which constituted each operation value memorized to the result-of-an-operation file as resemble an addition means to add as the final result shown in all the fourier transformations.

[Claim 2] It is fast-Fourier-transform equipment according to claim 1 with which the test data of N individual is supplied to the above-mentioned fourier transducer, as for this each test data, it has real part and imaginary part, and two or more above-mentioned fourier transformations are constituted by the discrete-Fourier-transform type of N individual, and this each Fourier transform type has the term of N individual.

[Claim 3] This result-of-an-operation file is fast-Fourier-transform equipment according to claim 1 which has a storage region for accumulating the above-mentioned result of an operation arranged in the shape of an array corresponding to all the terms of two or more above-mentioned fourier transformations.

[Claim 4] This result-of-an-operation file is fast-Fourier-transform equipment according to claim 1 which accumulates the accumulating totals of the above-mentioned result of an operation in this storage region by having a storage region for accumulating the above-mentioned result of an operation corresponding to the number of two or more above-mentioned fourier transformations, and adding the new result of an operation to the last result of an operation obtained about each item of this Fourier transform type by the above-mentioned Fourier transform.

[Claim 5] In the fourier inverter which carries out the Fourier transform using the transformation of a discrete Fourier transform The measurement count counter which carries out counting of the data number whenever a test data is obtained about each test point, The fourier converter which was specified by this data number and which performs a Fourier transform operation about two or more terms common among two or more fourier transformations, As the final result shown in all the fourier transformations, each operation value memorized to the result-of-an-operation file which was obtained with this Fourier transform vessel, and which memorizes the Fourier transform result of an operation of the common term between two or more fourier transformations, and the result-of-an-operation file An addition means to add, and fast-Fourier-transform equipment, from which it consisted of as be alike and a part for the redundancy of count in two or more above-mentioned terms of this Fourier transform type was removed.

[Claim 6] These two or more terms are fast-Fourier-transform equipment according to claim 5 with which it is the 3rd term and the operation of the Fourier transform is simultaneously performed about the 3rd term common among two or more above-mentioned fourier transformations.

[Claim 7] It is fast-Fourier-transform equipment according to claim 1 which this each Fourier transform type has the term of N individual, and performs the operation of the Fourier transform simultaneously about the 3rd term with the above-mentioned fourier transducer common among two or more above-mentioned fourier transformations by supplying the test data of N individual to the above-mentioned fourier transducer, and, as for this each test data, having real part and imaginary part, and two or more above-mentioned fourier transformations being constituted by the discrete-Fourier-transform type of N individual.

[Claim 8] The data sampling equipment which generates the data sample of N individual continuously, The fourier calculator classified by term which connects with this data sampling equipment and is calculated about the term corresponding to a carrier beam data sample among the fourier terms of N individual, The fourier storage

classified by term for this Fourier calculator classified by term operating by receiving this data sample, being connected to this Fourier calculator classified by term, and memorizing the this calculated Fourier term, Fast-Fourier-transform equipment which adds the calculated this Fourier term, resembles the accumulator which generates the Fourier transform result about the continuous data sample of this N individual, and is constituted more.

[Claim 9] In the network analyzer for analyzing the response characteristic of a testing device-ed The converter which changes the signal showing the response of the testing device-ed to the impressed signal into digital one. Connect with this transducer and this digital signal is processed in a frequency domain. The transfer function analyzer for calculating the transfer function of a response of the testing device-ed to the impressed this signal. This transfer function analyzer is further based on the this calculated transfer function. Correspond to the response characteristic over the signal with which this testing device-ed was simulated. The fast-Fourier-transform machine common to [calculate the signal in a frequency domain and] two or more discrete-Fourier-transform (DFT) types which performs juxtaposition Fourier transform actuation about at least one data sample in a frequency domain. It is the network analyzer which it connects so that this frequency-domain signal may be received, and this fast-Fourier-transform machine changes this frequency-domain signal into a time domain signal in the real time substantially, and this each discrete Fourier equation corresponds to the acquired time domain signal point, and is constituted by these.

[Claim 10] This fast-Fourier-transform machine is a network analyzer according to claim 9 which carries out juxtaposition Fourier transform actuation about two or more frequency-domain data samples which are common at two or more discrete-Fourier-transform ceremony.

[Claim 11] These two or more frequency-domain data samples are network analyzers according to claim 10 which the number of is three and perform the operation of the Fourier transform simultaneously about 3 data sample common among these two or more discrete-Fourier-transform types.

[Claim 12] This fast-Fourier-transform machine is a network analyzer according to claim 10 which carries out juxtaposition Fourier transform actuation about three continuous frequency-domain data samples common to two or more discrete-Fourier-transform types.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the fast-Fourier-transform equipment which uses for measuring instruments, such as a network analyzer or a spectrum analyzer, and performs especially a discrete Fourier transform to juxtaposition about suitable fast-Fourier-transform equipment.

[0002]

[Description of the Prior Art] In measuring instruments, such as a network analyzer and a spectrum analyzer, the response characteristic of a component is analyzed or the Fourier transform technique (first fourier transformation), for example, FFT, is widely used for analyzing the frequency spectrum of an input signal etc. For example, such fourier transform processing is used for the time domain data measured and obtained in a predetermined corner between time amount. This time domain data is changed into frequency-domain data, and the frequency component in the frequency domain of an input signal is ****(ed), or it is asking for frequency spectrum.

[0003] Since the data of a frequency domain are changed into time domain data by fourier transform processing, reversely, it is called this also with an inverse Fourier transform in that case. For example, when measuring a filter or other communication link devices, with a network analyzer, a frequency-sweep signal is given to the examined device, and the signal of the frequency domain as the result is measured for every predetermined frequency step. It is based on this measured data, and a network analyzer calculates and displays various kinds of parameters, such as a transfer function of an examined device, a reflection coefficient, a phase shift, a group delay (group delay), and a Smith chart.

[0004] Further, a network analyzer may be used in order to calculate a response (TDR) in the time domain of an examined device, for example, a time-axis reflection property. In that case, the frequency-domain data in which the transfer function of an examined device is shown are changed into time domain data by the inverse Fourier transform. Before this inverse Fourier transform processing, a windowing function may take the advantage of a transfer function in a frequency domain. Thereby, it can analyze, without impressing an impulse to the device actually, the response characteristic, for example, impulse response property, in a time domain of an examined device.

[0005] The technique of such the Fourier transform is fundamentally based on the so-called ****-Fourier transform, and the response of an examined device is measured as discrete HAMONIKUSU obtained by the continuous sample of fixed spacing. A discrete Fourier transform requires many counts of an operation. That is, it is N^2 when carrying out the discrete Fourier transform of the measured value obtained from the point of measurement of N individual. Since the operation of a time was needed and the amount of operations became huge, there was a fault which requires big time amount for the operation as the whole.

[0006] In order to cancel this fault, the fast-Fourier-transform approach called FFT was developed by CHUKII with Kelley. FFT is an algorithm for decreasing the count of an operation which a discrete Fourier transform takes, generally is performed by computer and reduces the count of an operation by removing the redundancy actuation in activation of the Fourier transform. According to FFT, the amount of operations in the case of carrying out the Fourier transform of the sample data of N individual is expressed with $N \log_2 N$. Therefore, since FFT can decrease the amount of operations substantially from the ****-Fourier transform, when treating especially the data of a large quantity, it can perform high-speed processing farther than the conventional discrete Fourier transform.

[0007] However, this FFT also has a fault. First, since FFT needs that the number of data of N individual to deal with is the exponentiation of 2, the application may be restricted. Moreover, as other important problems, FFT has the special feature which cannot begin to calculate the Fourier transform, if not all the sample data of N individual gather. For this reason, time amount required by the Fourier transform termination from measurement

initiation is the measuring time TMES, as shown in drawing 8. Data-processing time amount TFFT It added. TMES +TFFT It becomes the time amount which the whole Fourier transform takes.

[0008] On the other hand, FFT is developed and there is also the Fourier transform approach currently called the chirp Z transform which resolving power can improve the Fourier transform from FFT. Other advantages of this chirp Z transform approach are not needing the number of data samples being the exponentiation of 2. This Fourier transform technique is indicated by the "theory [of digital signal processing], and application" 393-398 page by RABINA and the gold of issuance in 1975. The time amount which conversion takes since it will be the conversion approach of having repeated FFT 3 times and obtaining a result, if this conversion approach is restricted to a conversion time is 3 times as much time amount 3TFFT as FFT to the measuring time TMES, as shown in drawing 9. It becomes the added time amount. That is, chirp Z transform requires a conversion time longer than a required conversion time in the conventional FFT.

[0009]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] Therefore, the object of this invention is to offer the fast-Fourier-transform approach that the problem in the conventional Fourier transform technique is conquerable, and equipment. Other objects of this invention are the measuring time TMES. The fast-Fourier-transform approach and equipment which can include and can obtain the result of the Fourier transform from the conventional FFT technique in a short time are proposed. The object of further others of this invention is to provide it and coincidence with the fast-Fourier-transform approach and equipment which perform a discrete-Fourier-transform process in real time, obtaining sample data. The object of further others of this invention is to offer the fast-Fourier-transform approach and equipment which perform a discrete-Fourier-transform process in juxtaposition about each item of the fourier transformation. The object of further others of this invention is to offer the fast-Fourier-transform approach and equipment which perform a discrete-Fourier-transform process in juxtaposition about two or more terms which the fourier transformation followed. The object of further others of this invention is to offer the network analyzer equipment using the fast-Fourier-transform approach of performing a discrete-Fourier-transform process in juxtaposition, about the independent term or continuous two or more terms of the fourier transformation.

[0010] The fast-Fourier-transform approach of this invention and equipment are based on the juxtaposition discrete-Fourier-transform technique newly developed by the applicant of this invention. The fast Fourier transform of this invention is based on the data that the operation of the common term between two or more fourier transformations can be performed independently of other common terms based on the data sample of the sequence corresponding to it. Total of each term of the fourier transformation brings a final Fourier transform result. The Fourier transform technique of this invention is attained again using improvement in the speed of actuation of the latest digital processing device. Moreover, in case the fast-Fourier-transform approach of this invention and equipment perform a juxtaposition discrete Fourier transform, by summarizing two or more terms to continue and calculating the Fourier transform, they exclude the redundancy of an operation and are decreasing the count of count.

[0011] The fast-Fourier-transform equipment of this invention is constituted by the discrete-Fourier-transform machine which carries out a conversion operation about the common term to which two or more fourier transformations correspond whenever a data sample is obtained. The common term corresponds in order of the data sample which carried out counting from initiation of measurement actuation. The fast-Fourier-transform equipment of this invention has the result-of-an-operation file which memorizes further the operation value which this discrete-Fourier-transform means calculated according to an array corresponding to the term of two or more fourier transformations. The fast-Fourier-transform equipment of this invention adds further the operation value memorized by this result-of-an-operation file according to the array of a conversion result for every array of each conversion result, and has the adder for obtaining the final conversion result of two or more fourier transformations.

[0012] According to the fast-Fourier-transform equipment by this invention, a frequency-sweep signal is inputted into an examined device, for example. About predetermined frequency spacing of this swept frequency generation signal, N time measurement of the output signal of an examined device is carried out, and the frequency-domain data of measurement size N are obtained. A discrete Fourier transform is performed about the common term corresponding to the order of acquisition of the data sample obtained by this measurements process about the fourier transformation of N individual. The measurement count on the basis of the start point of the measurements process prescribes the order of acquisition of a data sample, for example. The operation process about the common term of the fourier transformation is performed in the real time about the acquired data sample, and before the following data sample is obtained, it is ended. Therefore, by the time the following measurement data sample is obtained, the operation of common N term of a discrete-Fourier-transform type will be performed. By improvement in the speed of the latest digital-signal-processing device, it is quicker than the

time amount of each frequency spacing of an analog sweep frequency generator, and the discrete-Fourier-transform operation of common N term is possible.

[0013] Therefore, when the last measured value is obtained, the operation of all the terms of a discrete Fourier transform is completed about the measurement data of N individual only by carrying out the last Fourier transform [Nth]. If the result of an operation according to acquired term is added according to the array of the fourier transformation, a final Fourier transform result can be obtained.

[0014] According to this invention after all, it is the measuring time TMES. Time amount TDFT which data processing for the 1st term in the fourier transformation takes It added. TMES+TDFT All data processing is completed by time amount. Since the time amount TDFT which data processing for the 1st term in the fourier transformation takes is shorter than time amount Δt during each point of measurement, according to this invention, a final Fourier transform result can be obtained almost simultaneously with acquisition termination of measurement data. In other examples of this invention, the redundancy of the count in a discrete Fourier transform is excluded, and the technique of decreasing the count of count as the whole is shown. The above objects and predominance of this invention will become clearer with reference to the following detailed explanation and the attached drawing.

[0015]

[Means for Solving the Problem]

[0016] In the fourier inverter which carries out the Fourier transform using the operation expression of a discrete Fourier transform The measurement count counter which carries out counting of the data number whenever a test data is obtained about a test point, The fourier converter which was specified by the data number and which performs a Fourier transform operation about the common term between two or more fourier transformations, The result-of-an-operation file which was obtained by this fourier converter and which memorizes the Fourier transform result of an operation about the common term between two or more fourier transformations, Fast-Fourier-transform equipment is constituted as resemble an addition means to add each operation value memorized to the result-of-an-operation file as the final result shown in all the fourier transformations.

[0017] Moreover, the test data of N individual is supplied to the above-mentioned fourier transducer with above fast-Fourier-transform equipment, as for each of that test data, it has real part and imaginary part, and two or more above-mentioned fourier transformations are constituted by the discrete-Fourier-transform type of N individual, and each of that Fourier transform type may be constituted so that it may have the term of N individual. Moreover, corresponding to all the terms of two or more above-mentioned fourier transformations, the result-of-an-operation file may consist of above fast-Fourier-transform equipment so that it may have a storage region for accumulating the above-mentioned result of an operation arranged in the shape of an array. Moreover, the result-of-an-operation file has a storage region for accumulating the above-mentioned result of an operation corresponding to the number of two or more above-mentioned fourier transformations, and by adding the new result of an operation to the last result of an operation obtained about each item of the fourier transformation by the above-mentioned Fourier transform, it may constitute it from above fast-Fourier-transform equipment so that the accumulating totals of the above-mentioned result of an operation may be accumulated in the storage region.

[0018] Furthermore, you may constitute as follows. In the fourier inverter which carries out the Fourier transform using the transformation of a discrete Fourier transform The measurement count counter which carries out counting of the data number whenever a test data is obtained about each test point, The fourier converter which was specified by the data number and which performs a Fourier transform operation about two or more terms common among two or more fourier transformations, As the final result shown in all the fourier transformations, each operation value memorized to the result-of-an-operation file which was obtained by this fourier converter, and which memorizes the Fourier transform result of an operation of the common term between two or more fourier transformations, and the result-of-an-operation file Resemble an addition means to add is constituted, a part for the redundancy of count in two or more above-mentioned terms of the fourier transformation is removed, and fast-Fourier-transform equipment is constituted.

[0019] Moreover, two or more of the terms are the 3rd term, and they may consist of above-mentioned fast-Fourier-transform equipment so that the operation of the Fourier transform may be simultaneously performed about the 3rd term common among two or more above-mentioned fourier transformations. Moreover, the test data of N individual is supplied to the above-mentioned fourier converter with above fast-Fourier-transform equipment. Each of that test data has real part and imaginary part, and two or more above-mentioned fourier transformations are constituted by the discrete-Fourier-transform type of N individual. Each of that Fourier transform type has the term of N individual, and it may constitute the above-mentioned fourier converter so that the operation of the Fourier transform may be simultaneously performed about the 3rd term common among two

or more above-mentioned fourier transformations.

[0020] Furthermore, you may constitute as follows. The data sampling equipment which generates the data sample of N individual continuously, The fourier calculator classified by term which connects with the data sampling equipment and is calculated about the term corresponding to a carrier beam data sample among the fourier terms of N individual, The fourier storage classified by term for that fourier calculator classified by term operating by receiving that data sample, being connected to this fourier calculator classified by term, and memorizing that calculating fourier term, The calculated fourier term may be added, the accumulator which generates the Fourier transform result about the continuous data sample of the N individual may be resembled, and fast-Fourier-transform equipment may be constituted more.

[0021] Furthermore, you may constitute as follows. In the network analyzer for analyzing the response characteristic of a testing device-ed The converter which changes the signal showing the response of the testing device-ed to the impressed signal into digital one, Connect with the transducer and the digital signal is processed in a frequency domain. The transfer function analyzer for calculating the transfer function of a response of the testing device-ed to the impressed signal, The transfer function analyzer is further based on the calculated transfer function. Correspond to the response characteristic over the signal with which the testing device-ed was simulated. The fast-Fourier-transform machine common to [calculate the signal in a frequency domain and] two or more discrete-Fourier-transform (DFT) types which performs juxtaposition Fourier transform actuation about at least one data sample in a frequency domain, It connects so that the frequency-domain signal may be received, the fast-Fourier-transform machine changes the frequency-domain signal into a time domain signal in the real time substantially, and each of that discrete Fourier equation may correspond to the acquired time domain signal point, and may constitute a network analyzer by these.

[0022] Moreover, the fast-Fourier-transform machine may consist of above-mentioned network analyzers so that juxtaposition Fourier transform actuation may be carried out about two or more frequency-domain data samples which are common at two or more discrete-Fourier-transform ceremony. Moreover, the number of two or more of the frequency-domain data samples is three, and they may consist of above-mentioned network analyzers so that the operation of the Fourier transform may be simultaneously performed about 3 data sample common among two or more of the discrete-Fourier-transform types. Moreover, three continuous frequency-domain data samples common to two or more discrete-Fourier-transform types may constitute the fast-Fourier-transform machine from the above-mentioned network analyzer so that juxtaposition Fourier transform actuation may be carried out.

[0023]

[Embodiment of the Invention] One example of the fourier inverter by this invention is shown in drawing 1 . In the example shown in drawing 1 , a frequency sweep signal is given to the test circuit 12-ed from the frequency sweep oscillator 11. The signal outputted from the test circuit 12-ed is inputted into a detector circuit 13. A detector circuit 13 detects the real part and imaginary part in a frequency of an oscillation signal of the frequency sweep oscillator 11 about the output signal from the test circuit 12-ed. The frequency for this trial is almost possible in the range from a direct current to a microwave frequency, and it is suitable for the test objective-ed which operates especially with a radio frequency. The frequency sweep oscillator 11 can also supply the signal of the fixed frequency according to individual to a test circuit-ed as known well. A-D converters 19 and 20 undergo the detection output of the real part from a detector circuit 13, and imaginary part, and change them into a digital signal.

[0024] The digital data from an A-D converter is inputted into the fourier converter 14. This input data serves as complex measured value (the following measured value $x(0)$, $x(1)$, $x(2)$ $x(n-1)$ is called), and gets down, and the fourier transducer 14 performs a high-speed discrete Fourier transform about this input data. Thereby, the Fourier transform (a forward type inverse Fourier transform) of the frequency-domain data is carried out, and they turn into data of a time domain.

[0025] The frequency-sweep transmitter 11 performs frequency-sweep actuation which a dispatch frequency increases linearly from a frequency $F1$ to $F2$ with progress of time amount T , as shown in drawing 2 . An A-D converter repeats an AD translation to every [therefore] fixed time interval Δt and every constant frequency step Δf [of drawing 2] f . The measured value $x(0)$ obtained from a detector circuit 13 and an A-D converter if the frequency-sweep rate of the frequency-sweep oscillator 11 is fixed, $x(1)$, $x(2)$ $x(n-1)$ can be regarded as the measured value which measured the responded output of the test circuit 12-ed to every fixed frequency spacing Δf .

[0026] The fast-Fourier-transform equipment 14 by this invention performs a juxtaposition discrete Fourier transform (PDFT), and is constituted, memory 17 ***** 18, for example, a CRT monitor, the input means 15, for example, a data buffer, and the processing device 16 as a signal processor, for example, a digital signal processor. The processing device 16 has measurement count counter 16A, fourier converter 16classified by

term B, and adder 16C. Preferably, this processing device 16 consists of a digital signal processor of Texas Instruments, and TMS320C30. Memory 17 has result-of-an-operation file 17A for memorizing the result of an operation of fourier converter 16classified by term B.

[0027] Drawing 4 and drawing 5 express result-of-an-operation file 17A prepared in the operation expression used for a discrete Fourier transform, and memory 17. Operation expression of a discrete Fourier transform for changing time domain data into frequency-domain data $X(n) = 1/N \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \exp(-j2\pi n m/N) \dots (1)$ When frequency-domain data are changed into time domain data $X(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \exp(j2\pi n m/N) \dots (2)$,

It is come out and expressed. In the example of this drawing 1, since the case where the data of a frequency domain are changed into the data of a time-axis field is explained, the following explanation is given to explain based on (2) types. Probably, it will be clear to those who have the usual information of this technical field that the principle of this invention is applicable, whichever it is the conversion direction.

[0028] In a formula 2, $X(n)$ shows the conversion result which carried out the Fourier transform. Being able to express a formula 2 to two or more formulas as shown in drawing 4, $X(n)$ will express each point of each time domain. The right-hand side of each type is the set of the term calculated corresponding to it, when measured value $x(m)$ and a (frequency-domain data sample) are given. It sets to two or more operation expression shown in drawing 4, and one description of this invention is measured value $x(0)$, $x(1)$, and $x(2) \dots$ Whenever one of the $x(n-1)$ is obtained, it is in the operation of the Fourier transform term of N individual being made in two or more operation expression shown in drawing 4.

[0029] In order to perform this fourier translation process, in this invention, measurement count counter 16A and fourier converter 16classified by term B are prepared. Measurement count counter 16A lets a detector circuit 13 and an A-D converter pass, and is measured value $x(0)$, $x(1)$, and $x(2) \dots$ Whenever $x(n-1)$ is inputted, the enumerated data are carried out +one, and counting of the number of measurement data is carried out. According to the data number of measurement count counter 16A, fourier transducer 16classified by term B specifies the item number number of operation expression, and performs the operation of the Fourier transform about the specified item number number. This operation is performed about the term of the same location of the formula of drawing 4, i.e., the same column. The result of an operation is memorized by result-of-an-operation file 17A prepared in memory 17.

[0030] The situation inside result-of-an-operation file 17A is shown in drawing 5. the label A in drawing --- 0, 0, and ... A(N-1) and (N-1) show each term of the fourier operation expression (drawing 4) stored in result-of-an-operation file 17A. In the example of drawing 5, the suffix of the point of Label A shows the sequence of the time domain point, and a next suffix shows the sequence of a data sample.

[0031] If the 1st measured value $x(0)$ is inputted from an A-D converter, measurement count counter 16A will initialize a measurement count n to $n=0$. Measurement count counter 16A directs to calculate the 1st item of the fourier transformation to fourier converter 16classified by term B. the item [1st] operation of the operation expression having shown fourier converter 16classified by term B in drawing 4 according to the directions, and $x(0) \exp(j2\pi 0 \cdot 0/N)$, $x(0) \exp(j2\pi 1 \cdot 0/N)$, $x(0) \exp(j2\pi 2 \cdot 0/N)$, and ... $x(0) \exp(j2\pi (N-1) \cdot 0/N)$ is performed. each result of an operation --- the array variable part A of result-of-an-operation file 17A of drawing 5 --- 0 and 0A --- 1 and 0A --- 2, 0, and ... AN- 1 and 0 memorize.

[0032] If the 2nd measured value $x(1)$ is inputted from an A-D converter, measurement count counter 16A will set a measurement count n as $n=1$, in order to show that this data is the 2nd measurement data. It is directed that measurement count counter 16A calculates the 2nd item of the fourier transformation to fourier converter 16classified by term B with this. The item [2nd] operation of the operation expression having shown fourier converter 16classified by term B in drawing 4 according to the directions by this, $x[\text{namely, }](1) \exp(j2\pi 0 \cdot 1/N)$, $x(1) \exp(j2\pi 1 \cdot 1/N)$, $x(1) \exp(j2\pi 2 \cdot 1/N)$, and ... $x(1) \exp(j2\pi (N-1) \cdot 1/N)$ is performed. each result of an operation --- the array variable part A of result-of-an-operation file 17A of drawing 5 --- 0 and 1A --- 1 and 1A --- 2, 1, and ... AN- 1 and 1 memorize.

[0033] Thus, the measured value $x(0)$ in which the A-D converter carried out the AD translation in this invention, $x(1)$, $x(2) \dots$ Whenever it outputs $x(n-1)$, the Fourier transform is carried out for every term. What is necessary is to perform only the operation of the last term, when the last measured value $x(N-1)$ is inputted, since the operation for every term can be managed with the desirable example by the time the following measured value is inputted (inside of the time amount of $**t$). This result of an operation is memorized by result-of-an-operation file 17A of drawing 5. each result of an operation finally memorized to result-of-an-operation file 17A by adder 16C --- adding --- the conversion results $X(0)$ and X of each Fourier transform type (1), and ... $X(N-1)$ is calculated. The final result of the Fourier transform can be displayed with gestalten, such as a numerical train or a graph, with a drop 18.

[0034] In the desirable example, the Fourier transform according to each of this item is ended within the limits of

repeat-time **t in a detector circuit 13 or A-D converter 19. Therefore, the time amount which the Fourier transform of the fast-Fourier-transform equipment 14 by this invention takes is measured value $x(0)$, $x(1)$, and $x(2)$, as shown in drawing 6 It will end with time amount $TMES+TDFT$ which added the data-processing time amount $TDFT$ of the term of the last of fourier converter 16classified by term B to the measuring time $TMES$ of $x(n-1)$ of the whole.

[0035] When the measurement mark N are made into 200 points, supposing the operation time $TDFT$ of fourier converter 16classified by term B uses DSP (digital signal processor) which operates with the clock frequency of 50MHz, it can process the operation of each item in about 200 microseconds. therefore, sweep step time **t of the frequency-sweep oscillator 11 is set to about 1ms, and the conversion rate of an A-D converter is shown in drawing 6, when it is made to suit this step time -- as -- measured value $x(0)$, $x(1)$, and $x(2)$ each item of the fourier transformation can fully be calculated in the range of repeat-time **t in which $x(n-1)$ is inputted.

[0036] Thus, if DSP which can generally come to hand is used, the operation time $TDFT$ about the common term of fourier converter 16classified by term B is 200 microseconds, and can be performed by the step time of a sweep signal oscillator, for example, time amount shorter enough than one millisecond. Therefore, according to this invention, the time amount which the whole Fourier transform takes turns into time amount almost equal to the measuring time $TMES$ shown in drawing 6. Therefore, by the fourier inverter and approach of this invention, it is convertible for a high speed from the conventional FFT.

[0037] in addition, a number equal to the item number number of the operation expression used for the Fourier transform in the above-mentioned example of array variable parts A -- 0 and 0 ... although the example which prepared A (N-1) and (N-1) in result-of-an-operation file 17A was shown, other data accumulation management methods are possible. For example, whenever it calculates each fourier function classified by term, the approach of adding the result of an operation which calculated to the result of an operation calculated in the past this time, and was obtained can also be taken. in this case, it is shown in drawing 7 -- as -- memory arrangement of result-of-an-operation file 17A -- A0, A1, A2, and the array structure of an one direction is sufficient like AN-1, and the sum of each fourier term of the fourier transformation of N individual is stored there.

[0038] The 2nd example of this invention is explained below. In this example, a discrete Fourier transform is collectively calculated about two or more data points to continue. In this invention, the operand as the whole can be decreased by observing the redundancy which exists in the operation of two or more fourier terms to continue. It is $\exp(j2\pi n-m/N)$ in the above-mentioned formula 2 $W_n:m$ If simple is carried out and it replaces, the discrete-Fourier-transform type of drawing 4 will be expressed as follows.

$X(0) = x(0)W_{0:0} + x(1)W_{0:1} + x(2)W_{0:2} + \dots + x(N-1)W_{0:N-1}$
 $X(1) = x(0)W_{1:0} + x(1)W_{1:1} + x(2)W_{1:2} + \dots + x(N-1)W_{1:N-1}$
 $X(2) = x(0)W_{2:0} + x(1)W_{2:1} + x(2)W_{2:2} + \dots + x(N-1)W_{2:N-1}$
 $X(N-1) = x(0)W_{N-1:0} + x(1)W_{N-1:1} + x(2)W_{N-1:2} + \dots + x(N-1)W_{N-1:N-1}$... (3) [0039] $x(2)W_{0:2}$ [in / in order to perform the Fourier transform / each item of the fourier transformation, for example, the first formula,] ***** -- eight count is required. The reason is the following. The multiplication of two complex is expressed as follows.

$(a+jb)(c+jd) = (ac-bd) + j(ad+bc)$... (4) -- as for it, four multiplication and two addition show a configuration, now that it is. It still needs to be calculated of the fourier transformation twice for accumulating the real part and imaginary part of this count result to the real part and imaginary part of a count result before that, respectively. Therefore, eight count will be required in total about the term of 1 of a transformation.

[0040] In order to decrease the count of count which a discrete Fourier transform takes, the case where it calculates collectively is considered about three terms to continue. It is as follows when the 3rd term in a formula 3 to continue is expressed with a general format.

$$\begin{aligned} X(n-1)W_{0:n-1} + X(n)W_{0:n} + X(n+1)W_{0:n+1} \\ X(n-1)W_{1:n-1} + X(n)W_{1:n} + X(n+1)W_{1:n+1} \\ \vdots \\ X(n-1)W_{n-1:n-1} + X(n)W_{n-1:n} + X(n+1)W_{n-1:n+1} \\ X(n-1)W_{n:n-1} + X(n)W_{n:n} + X(n+1)W_{n:n+1} \\ X(n-1)W_{n+1:n-1} + X(n)W_{n+1:n} + X(n+1)W_{n+1:n+1} \\ \vdots \\ X(n-1)W_{N-1:n-1} + X(n)W_{N-1:n} + X(n+1)W_{N-1:n+1} \\ \dots (5) \end{aligned}$$

[0041] This formula 5 can deform as follows.

$$\begin{aligned}
W_{0:n} & \{ W_{0:-1} X(n-1) + X(n) + W_{0:1} X(n+1) \} \\
W_{1:n} & \{ W_{1:-1} X(n-1) + X(n) + W_{1:1} X(n+1) \} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{ W_{n-1:-1} X(n-1) + X(n) + W_{n-1:1} X(n+1) \} \\
W_{n:n} & \{ W_{n:-1} X(n-1) + X(n) + W_{n:1} X(n+1) \} \\
W_{n+1:n} & \{ W_{n+1:-1} X(n-1) + X(n) + W_{n+1:1} X(n+1) \} \\
& \vdots \\
W_{N-1:n} & \{ W_{N-1:-1} X(n-1) + X(n) + W_{N-1:1} X(n+1) \} \\
& \dots (6)
\end{aligned}$$

[0042] When the number of complexes conjugate is expressed with suffix *, it is $W_{n:-1}=W_{n:1}^*$. Since relation is realized, the above-mentioned formula 6 is rewritten as follows.

$$\begin{aligned}
W_{0:n} & \{ W_{0:1}^* X(n-1) + X(n) + W_{0:1} X(n+1) \} \\
W_{1:n} & \{ W_{1:1}^* X(n-1) + X(n) + W_{1:1} X(n+1) \} \\
& \vdots \\
W_{n-1:n} & \{ W_{n-1:1}^* X(n-1) + X(n) + W_{n-1:1} X(n+1) \} \\
W_{n:n} & \{ W_{n:1}^* X(n-1) + X(n) + W_{n:1} X(n+1) \} \\
W_{n+1:n} & \{ W_{n+1:1}^* X(n-1) + X(n) + W_{n+1:1} X(n+1) \} \\
& \vdots \\
W_{N-1:n} & \{ W_{N-1:1}^* X(n-1) + X(n) + W_{N-1:1} X(n+1) \} \\
& \dots (7)
\end{aligned}$$

[0043] When the expression of a formula 7 is changed into the format of the sum of real part and imaginary part, the part of the 5th line in a formula 7 is expressed as follows, for example.

$W_{n:n} \{ W_{n:1}^* x(n-1) + x(n) + W_{n:1} x(n+1) \} \dots (8)$ [0044] Since explanation is easy, if n in Data x is omitted, in the expression of a formula 8, a formula 8 will be rewritten as follows.

$W_{n:n} \{ W_{n:1}^* x-1 + x_0 + W_{n:1} x+1 \} \dots (9)$ [0045] It is as follows when a formula 9 is developed in the format of the sum of real part and imaginary part.

$$\begin{aligned}
W_{n:n} & \{ \{ x_0 + W_{n:1r} (x_{-1r} + x_{1r}) + W_{n:1i} (x_{-1i} - x_{1i}) \} \\
& + j \{ W_{n:1r} (x_{-1i} + x_{1i}) + W_{n:1i} (x_{1r} - x_{-1r}) \} \} \\
& \dots (10)
\end{aligned}$$

[0046] Here, it is as follows when replacement of $x+r=x-1 \ r+x+1r$, $x+i=x-1 \ i+x+1i$, $x-r=x-1 \ r-x+1r$, and $x+i=x-1 \ i-x+1i$ is performed about a formula 10.

$W_{n:n} \{ x_0 \ r + W_{n:1} \ r x + r + W_{n:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{n:1r} \ i x - i - W_{n:1} \ i x - r) \} \dots (11)$ [0047] Therefore, it is as follows when the whole formula 7 is applied to the format of the sum of real part like a formula 11, and imaginary part.

$W_{0:n} \{ x_0 \ r + W_{0:1r} \ r x + r + W_{0:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{0:1r} \ i x - i - W_{0:1} \ i x - r) \} \ W_{1:n} \{ x_0 \ r + W_{1:1r} \ r x + r + W_{1:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{1:1r} \ i x - i - W_{1:1} \ i x - r) \} \ W_{n-1:n} \{ x_0 \ r + W_{n-1:1r} \ r x + r + W_{n-1:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{n-1:1r} \ i x - i - W_{n-1:1} \ i x - r) \} \ W_{n:n} \{ x_0 \ r + W_{n:1r} \ r x + r + W_{n:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{n:1r} \ i x - i - W_{n:1} \ i x - r) \} \ W_{n+1:n} \{ x_0 \ r + W_{n+1:1r} \ r x + r + W_{n+1:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{n+1:1r} \ i x - i - W_{n+1:1} \ i x - r) \} \ W_{N-1:n} \{ x_0 \ r + W_{N-1:1r} \ r x + r + W_{N-1:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{N-1:1r} \ i x - i - W_{N-1:1} \ i x - r) \} \dots (12)$ [0048] In parenthesis { } of a formula 12, it turns out that the required counts of count are four multiplication and four addition. If this count is completed, a formula 12 turns into the above-mentioned formula 4 and the same format, and needs four multiplication and two addition for that count as mentioned above. It still needs to be calculated for the real part of this count result, the real part of the count result which was able to obtain imaginary part by then, and imaginary part twice for accumulating, respectively. Therefore, the count of an operation of the 3rd term which a formula 12 continues becomes 16 times as a whole. As the formula 4 described, supposing any simplification was not made, in actuation of a juxtaposition discrete Fourier transform, a total of 24 count was required about the 3rd term of each transformation. If the above operations are made about the 3rd continued term, an operation will be similarly performed about the 3rd term which a degree continues, and this count process will be repeated every 3rd term.

[0049] The 3rd example of this invention is explained below. In explanation of the operation of the 3rd term in the 2nd above-mentioned example to continue, since it is $W_{N-m:n}=W_{m:n}^*$, in addition to simplification of the above count, the count of count can be decreased further. For example, the line of the last of a formula 12 is convertible as follows.

$W_{1:n} \{ x_0 \ r + W_{1:1r} \ r x + r - W_{1:1} \ i x - i + j (x_0 \ i + W_{1:1r} \ i x - i + W_{1:1} \ i x - r) \} \dots (13)$ [0050] Moreover, the 2nd line of a formula

12 is convertible as follows.

W1: n [x0 r+W1:1 rx+r+W1:1 ix-i+j (x0 i+W1:1 rx1 i-W1:1 ix-r)] ... (14) [0051] When a formula 13 is compared with a formula 14, it turns out that it has six common operations mutually. If it follows, for example, count of a formula 13 is completed, it is not necessary to perform a formula 14 and a common thing by the operation in it in the case of count of a formula 14. Since such relation is applied similarly between the formulas of other couples, it can decrease the count of count further. Since there are six common operations between two formulas in this example, about one formula, 3 times of the counts of count can be omitted, therefore it will be good as the whole formula of 1 at 13 count. Therefore, although the count of count about the 3rd term was required of the 1st example of this invention 24 times, in this 3rd example, the count of count can realize big reduction from 24 times to 13 times.

[0052] The 4th example of this invention is explained below. It is applicable effective in a network analyzer as shows the fast-Fourier-transform equipment mentioned above in the schematic diagram of drawing 10. A source 31 of a high frequency signal like a swept frequency generation generator gives a frequency scanning signal to the examined device 32. A frequency sweep is a step sweep as shown in drawing 2, and a linear frequency change is substantially made by many frequency steps. the frequency number of steps (point of measurement) -- several [of the data point of said discrete Fourier transform carried out] -- it corresponds to N. The source 31 of a RF signal generates a reference signal R again. For example, the reference signal R is the same as the frequency-sweep signal given to the examined device 32, and is used as criteria of the amplitude or a phase.

[0053] The output signal (stimulus) of the examined device 32 is impressed to a frequency converter 33. In this example, a frequency converter 33 lets a directional coupler and a directivity bridge (not shown) pass from the examined device 32, and receives two stimuli A and B. As an example of two stimuli, there are the transfer signal and reflective signal from the examined device 32. A frequency converter 33 receives the reference signal R from the source 31 of a RF signal further. A frequency converter 33 changes these input signals A, B, and R into the corresponding intermediate frequency stimuli A.I. Artificial Intelligence and BI and the intermediate frequency reference signal RI. This frequency conversion carries out the down convert of the signal frequency which was made according to the known process, for example, was inputted by the frequency mixer or the harmonic sampler so that it may become a difference with local signal frequency.

[0054] A-D converter 34-36 changes the corresponding intermediate frequency signals A.I. Artificial Intelligence, BI, and RI into reception, changes the intermediate frequency signal into a digital signal, and gives it to a multiplexer 38. A multiplexer 38 gives a digital signal selectively to a wave detector 41. A wave detector 41 is for example, a digital rectangular cross wave detector. A wave detector 41 detects the inphase (I) component (real part) of an input digital signal, and a 90-degree difference (Q) component (imaginary part). Such a rectangular wave detector has the multiplexer of a couple, one multiplexer multiplies by the input digital signal and the cosine local signal, and the multiplexer of another side multiplies by the input digital signal and the sign local signal as well known to this contractor. Furthermore, the low pass filter of a couple is connected to the output of a corresponding multiplexer.

[0055] The transfer function analyzer 42 analyzes various kinds of response characteristics of reception and the examined device 32, for example, a transfer function and a reflection coefficient, for I component and Q component from the digital rectangular cross wave detector 41, respectively. Such [typically] a response characteristic is expressed by the well-known scattering (S) parameters S11, S12, S21, and S22. With the error correction data in which the scattering parameter was stored by memory 45, error correction can be carried out and the result is displayed in the form of a frequency domain (frequency **** parameter) on a drop 48.

[0056] As for the network analyzer, it has the windowing-function generator 43 and the multi-term juxtaposition discrete-Fourier-transform machine (PDFT) 44 further the sake [in the case of wanting a user to calculate the response about the virtual signal in the time domain of an examined device]. As an example of a response in a time domain, there is a time domain reflection property (TIMEDOMAIN RIFUREKUTOMETORI: TDR) of an examined device to a virtual impulse signal. The instruction given by the user via the interface 51 is answered, and the frequency-domain data obtained by the transfer function analyzer 42 are changed by the windowing-function generator 43. There are a rectangular window and a Hamming window as an example of a windowing function. For example, if a suitable Hamming window is used for a frequency domain, the ringing in a time domain is effectively removable.

[0057] The example of an impulse wave in the time domain corresponding to the windowing function in a frequency domain is shown in drawing 11 (A) and drawing 1111 (B). 11 (A) shows the impulse wave of a time domain in case the function between apertures in a frequency domain is a rectangular window. Drawing 11 (B) shows the impulse wave of a time domain in case the function between apertures in a frequency domain is a Hamming window. By following, for example, multiplying a transfer function by the Hamming window in a

frequency domain, when the impulse of drawing 11 (B) is virtually given to an examined device, the wave in a time domain can be acquired.

[0058] The windowing-function generator 43 searches for the response characteristic in the time domain [as opposed to the virtual signal of an examined device using the data of a frequency domain] obtained from the transfer function analyzer 42 by the specified windowing function. The response characteristic in the time domain obtained as a result is displayed by the drop 48. The multi-term juxtaposition discrete-Fourier-transform machine 44 has the same configuration as the fast-Fourier-transform equipment 14 of drawing 1 fundamentally, and performs inverse Fourier transform actuation explained in each above-mentioned example. The count of count required of this juxtaposition discrete-Fourier-transform machine 44 can be decreased by considering that a part for the redundancy of count in two or more terms of the fourier transformation mentioned above. Therefore, the network analyzer of this invention can search for substantially the response characteristic in the time domain of an examined device on real time by being with the high-speed discrete-Fourier-transform equipment of this invention.

[0059] Vector error correction can be performed to a transfer function, and the error produced with the frequency converter and other components of a network analyzer can be amended as this technical field is furthermore sufficient and it is known. Moreover, the gate in a frequency shaft may be given to the output which gave the gate in a time-axis directly to the output obtained in the time domain, or was obtained in the frequency domain by the convolution.

[0060] moreover -- although the case where frequency-domain data were changed into time domain data above was explained -- time domain data -- frequency-domain data -- ** -- also when changing, it can be understood easily that the fast-Fourier-transform equipment by this invention can be used similarly. Furthermore, it does not mean that each above-mentioned example is used as an example on expedient of explanation, and limits the range of this invention. It will be understood that various deformation and modification can be performed without deviating from the technical range of this invention indicated by the claim.

[0061]

[Effect of the Invention] This invention does so the effectiveness indicated by the following from the above-mentioned content of explanation. According to this invention, it is the measuring time TMES. Time amount TDFT which data processing for the 1st term in the fourier transformation takes It added. TMES+TDFT All data processing is completed by time amount. Since the time amount TDFT which data processing for the 1st term in the fourier transformation takes was shorter than time amount **t during each point of measurement, according to this invention, the final Fourier transform result was able to be obtained almost simultaneously with acquisition termination of measurement data. In other examples of this invention, the redundancy of the count in a discrete Fourier transform was excluded, and the technique of decreasing the count of count as the whole has been realized.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.*** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] The block diagram showing the fundamental example of the fast-Fourier-transform equipment by this invention.

[Drawing 2] The conceptual diagram showing the frequency-sweep signal of the fast-Fourier-transform equipment shown in drawing 1.

[Drawing 3] The conceptual diagram showing the example of the frequency-domain data obtained by the fast-Fourier-transform equipment shown in drawing 1.

[Drawing 4] The conceptual diagram for explaining the operation expression of a discrete Fourier transform used by this invention.

[Drawing 5] The conceptual diagram showing the example of data of the result-of-an-operation file by this invention.

[Drawing 6] A timing chart to show the timing of the fast-Fourier-transform equipment by this invention of operation.

[Drawing 7] The conceptual diagram showing the example of data of the result-of-an-operation file by the deformation example of this invention.

[Drawing 8] The timing chart for explaining actuation of the conventional FFT technique.

[Drawing 9] The timing chart for explaining actuation of the conventional chirp Z transform.

[Drawing 10] The block diagram showing the example of a configuration of the network analyzer using the fast-Fourier-transform equipment of this invention.

[Drawing 11] Drawing 11 (A) and drawing 11 (B) are drawing showing the example of an impulse wave in the time domain corresponding to the windowing function in a frequency domain, respectively.

[Description of Notations]

11 Frequency-Sweep Oscillator

12 Test Circuit-ed

13 Detector Circuit

14 Fast-Fourier-Transform Equipment

15 Input Means

16 Signal Processor

16A Measurement count counter

16B The fourier converter classified by term

16C Adder

17 Memory

17A Result-of-an-operation file

18 Drop

31 Source of RF Signal

32 Examined Device

33 Frequency Converter

34 A-D Converter

35 A-D Converter

36 A-D Converter

38 Multiplexer

41 Wave Detector

42 Transfer Function Analyzer

43 Windowing-Function Generator

44 Juxtaposition Discrete-Fourier-Transform Machine

45 Memory
48 Drop
51 Interface

[Translation done.]

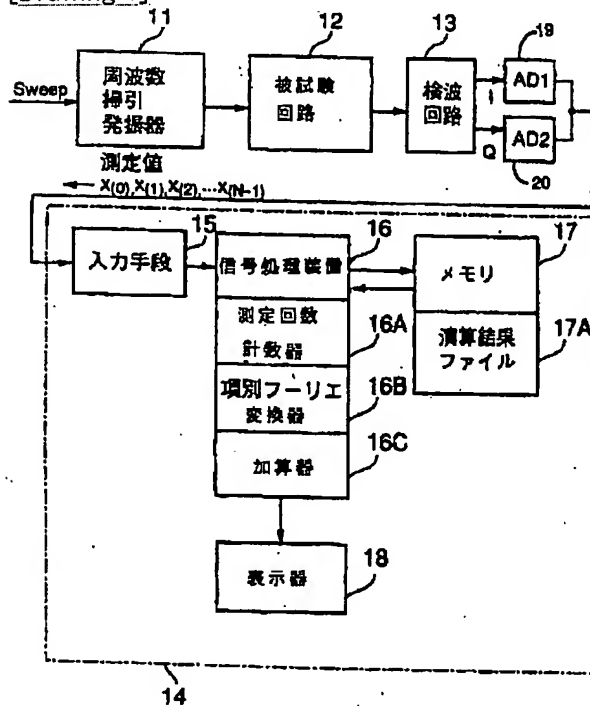
* NOTICES *

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

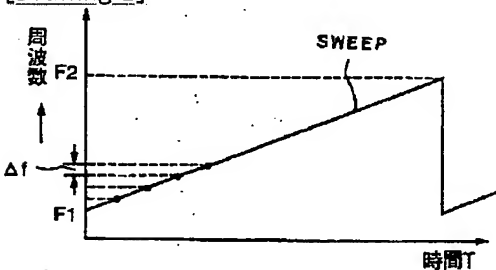
- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.*** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DRAWINGS

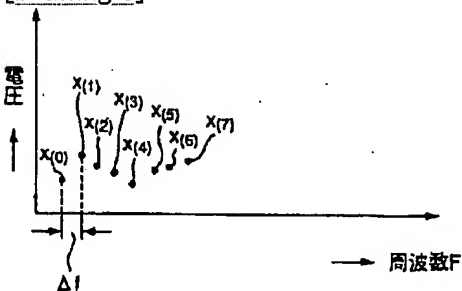
[Drawing 1]



[Drawing 2]



[Drawing 3]

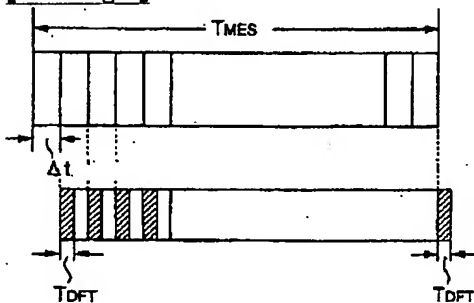


[Drawing 4]

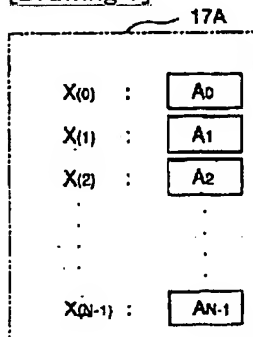
1回目の演算	2回目の演算	3回目の演算	N回目の演算
$X(0) = x(0)e^{j2\pi \cdot 0 \cdot 0/N} +$	$x(1)e^{j2\pi \cdot 0 \cdot 1/N} +$	$x(2)e^{j2\pi \cdot 0 \cdot 2/N} + \dots +$	$x(N-1)e^{j2\pi \cdot 0 \cdot (N-1)/N}$
$X(1) = x(0)e^{j2\pi \cdot 1 \cdot 0/N} +$	$x(1)e^{j2\pi \cdot 1 \cdot 1/N} +$	$x(2)e^{j2\pi \cdot 1 \cdot 2/N} + \dots +$	$x(N-1)e^{j2\pi \cdot 1 \cdot (N-1)/N}$
$X(2) = x(0)e^{j2\pi \cdot 2 \cdot 0/N} +$	$x(1)e^{j2\pi \cdot 2 \cdot 1/N} +$	$x(2)e^{j2\pi \cdot 2 \cdot 2/N} + \dots +$	$x(N-1)e^{j2\pi \cdot 2 \cdot (N-1)/N}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$X(N-1) = x(0)e^{j2\pi \cdot (N-1) \cdot 0/N} +$	$x(1)e^{j2\pi \cdot (N-1) \cdot 1/N} +$	$x(2)e^{j2\pi \cdot (N-1) \cdot 2/N} + \dots +$	$x(N-1)e^{j2\pi \cdot (N-1) \cdot (N-1)/N}$

変換結果

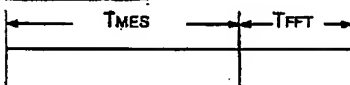
[Drawing 6]



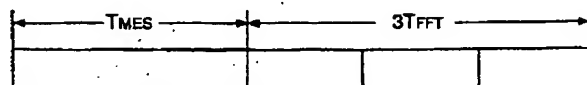
[Drawing 7]



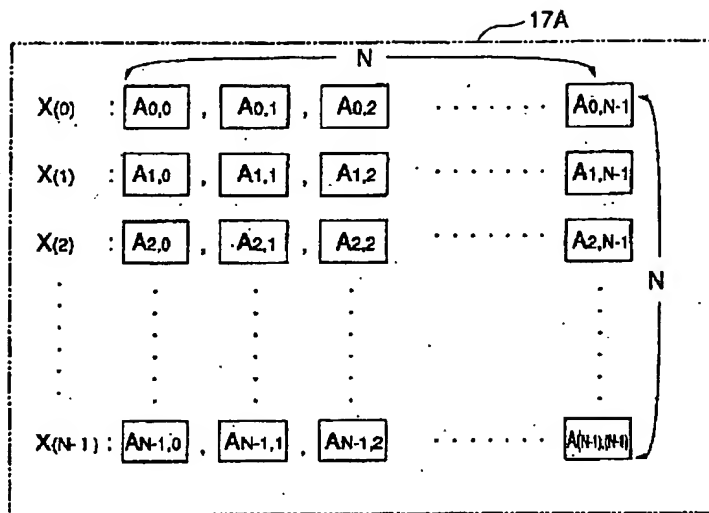
[Drawing 8]



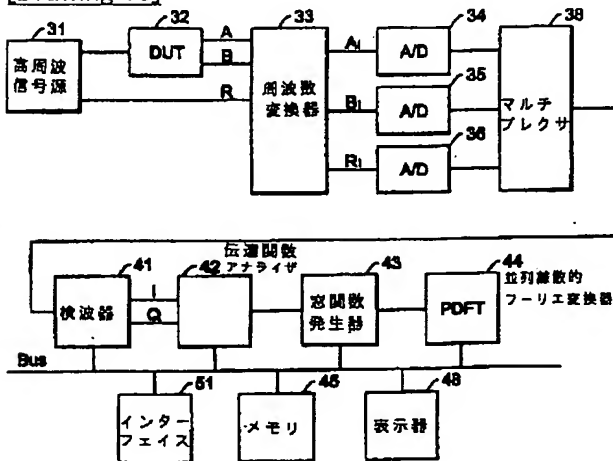
[Drawing 9]



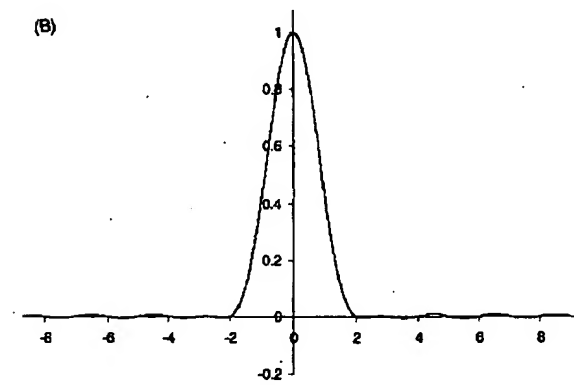
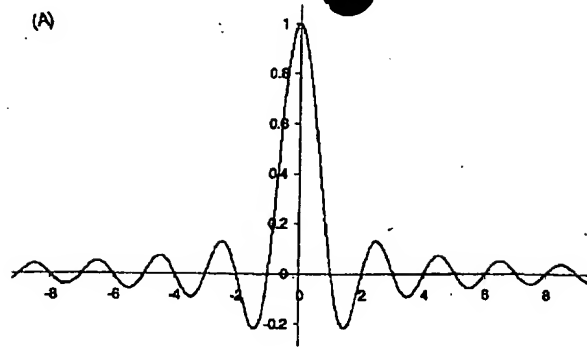
[Drawing 5]



[Drawing 10]



[Drawing 11]



[Translation done.]